

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه کشور

راهنمای استفاده از پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن

بخش دوم: مطالعات و مستندات

نشریه شماره ۲-۸۱۰

آخرین ویرایش: ۱۵-۰۹-۱۳۹۹

پژوهشگاه نیرو

گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت

<https://nri.ac.ir>

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

nezamfanni.ir

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی، مشاورین و پیمانکاران معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه کرده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

- ۱- در سامانه مدیریت دانش اسناد فنی و اجرایی (سما) ثبت نام فرمایید: sama.nezamfanni.ir
 - ۲- پس از ورود به سامانه سما و برای تماس احتمالی، نشانی خود را در بخش پروفایل کاربردی تکمیل فرمایید.
 - ۳- به بخش نظرخواهی این نشریه مراجعه فرمایید.
 - ۴- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
 - ۵- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
 - ۶- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
- کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می شود.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی شاه، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱، سازمان برنامه و بودجه،

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

Email: nezamfanni@mporg.ir

web: nezamfanni.ir

پیشگفتار

به استناد نظام فنی و اجرایی کشور موضوع ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه های توسعه و ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه، این سازمان وظیفه تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای فنی طرح های توسعه ای کشور را به عهده دارد. به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه های نگهداری و بهره برداری در قیمت تمام شده طرح ها را مورد تأکید جدی قرار دارد.

این نشریه جلد دوم از «راهنمای پیل های سوختی در کاربردهای ساکن» با عنوان «مستندات و مطالعات پیل های سوختی با کاربرد ساکن» می باشد.

در این نشریه در فصل اول تعاریف و اصطلاحات استفاده شده فراهم گردیده است. در فصل دوم پیشینه پیل های سوختی و کاربرد آنها در دنیا، در فصل سوم، الزامات فنی و مهندسی محصولات پیل های سوختی با کاربرد ساکن و در فصل چهارم، استانداردهای بین المللی بر اساس کاربرد مشترک بین پیل های سوختی و سیستم های مرسوم قبلی بررسی می شوند. در فصل پنجم به گردآوری و بررسی استانداردهای طراحی، تولید، نصب و راه اندازی و تعمیر و نگهداری سیستم های پیل سوختی، در فصل ششم به جمع آوری و بازنگری اسناد بالادستی و سندهای توسعه فناوری پیل سوختی، در فصل هفتم به بررسی الزامات فنی در مورد کاربردهای ساکن در داخل کشور و در فصل هشتم به بررسی محصولات قبلی ساخته شده و قوانین ایجاد شده قبلی در حوزه پیل سوختی در داخل کشور پرداخته می شود. در پایان نیز منابع و مراجع مورد استفاده معرفی شده است.

با وجود تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف شد، این مجموعه مصون از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پربار شدن این نشریه از کارشناسان محترم درخواست می شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور ارسال کنند. کارشناسان سازمان پیشنهادهای دریافت شده را بررسی کرده و در صورت نیاز به اصلاح در متن نشریه، با همفکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق پایگاه اطلاع رسانی نظام فنی و اجرایی کشور برای بهره برداری عموم، اعلام خواهند کرد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط معتبر، در بالای صفحات، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از این رو، همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

زمستان ۱۴۰۰

تهیه و کنترل «مطالعات و مستندات پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن»

[نشریه شماره ۲-۸۱۰]

مجری: پژوهشگاه نیرو

مدیر پروژه: مرتضی ترابی

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد مهندسی مواد

اعضای گروه تهیه‌کننده:

امید شاه‌حسینی

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت

حامد محبی موشائی

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد مهندسی مواد

امیر حاج‌علی رضائی

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

سید محمد منتظری

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد مهندسی مواد

سلمی السادات صدرنژاد

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد انرژی‌های تجدیدپذیر

مهدی مبارکی

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد مهندسی مواد

نسیم اکبری کفشگری

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت

اعضای گروه تاییدکننده: (به ترتیب حروف الفبا)

پرویز رمضانپور

پژوهشگاه نیرو

دکترای مهندسی برق-قدرت

نیکی مسلمی

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت

زهره مدیحی بیدگلی

پژوهشگاه نیرو

کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت

هدایت و راهبری (سازمان برنامه و بودجه)

علیرضا توتونچی

معاون امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

فرزانه آقارمضانعلی

رئیس گروه امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

محمد رضا طلاکوب

کارشناس امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

سید وحیدالدین رضوانی

کارشناس امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

علیرضا فخررحیمی

کارشناس امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه.....
۱	فصل ۱.....
۲	۱-۱- اصول پیل سوختی.....
۳	۲-۱- فرآوری سوخت.....
۳	۳-۱- الکترودها.....
۳	۴-۱- الکتروود آند.....
۴	۵-۱- الکتروود کاتد.....
۴	۶-۱- الکتروولیت.....
۴	۷-۱- استک پیل سوختی.....
۴	۸-۱- تجهیزات مبدل توان.....
۵	فصل ۲.....
۶	۱-۲- انواع پیل‌های سوختی و کاربرد آنها؛ محصولات تجاری.....
۷	۱-۱-۲- پیل سوختی اکسید جامد.....
۲۴	۲-۱-۲- کاربرد پیل سوختی اکسید جامد.....
۲۶	۳-۱-۲- توسعه پیل‌های سوختی اکسید جامد در دنیا.....
۳۱	۱-۳-۱-۲- Acumentrics.....
۳۱	۲-۳-۱-۲- Materials and Systems Research Incorporated (MSRI).....
۳۲	۳-۳-۱-۲- Ztec.....
۳۴	۴-۳-۱-۲- Technology Management, Inc. (TMI).....
۳۶	۵-۳-۱-۲- Mesoscopic Devices.....
۳۶	۶-۳-۱-۲- SOFCo (Mcdermott).....
۳۷	۷-۳-۱-۲- Honeywell (GE).....
۳۸	۸-۳-۱-۲- Delphi.....
۳۹	۹-۳-۱-۲- کمپانی Global thermoelectric.....
۴۰	۱۰-۳-۱-۲- توسعه SOFC در اروپا.....
۴۰	۱۱-۳-۱-۲- FZJ ، SOFC.....

۴۱.....	Siemens-Westinghouse-۱۲-۳-۱-۲
۴۳.....	Rolls Royce-۱۳-۳-۱-۲
۴۳.....	Sulzer-Hexis-۱۴-۳-۱-۲
۴۴.....	Wartsila-۱۵-۳-۱-۲
۴۵.....	Tokyo Gas و J-Power ژاپن-۱۶-۳-۱-۲
۴۶.....	Ceramics fuel cells limited-۱۷-۳-۱-۲
۴۸.....	۲-۲- پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)
۴۸.....	۱-۲-۲- تاریخچه
۵۰.....	۲-۲-۲- پیل سوختی اسید فسفریک
۵۲.....	۳-۲-۲- کاربردهای پیل سوختی PAFC
۵۲.....	۴-۲-۲- شرکت‌های تولید کننده پیل سوختی اسید فسفریک
۵۳.....	۱-۴-۲-۲- محصولات شرکت UTC
۵۴.....	۲-۴-۲-۲- شرکت Fuji Electric
۶۱.....	۳-۲- پیل سوختی کربنات مذاب
۶۴.....	۱-۳-۲- کاربردهای پیل‌های سوختی کربنات مذاب
۶۶.....	۴-۲- کشورها و شرکت‌های تولیدکننده و مصرف کننده MCFC
۶۶.....	۱-۴-۲- FuelCell Energy, FCE (USA)
۶۸.....	۲-۴-۲- شرکت POSCO Energy کره جنوبی
۶۹.....	۳-۴-۲- شرکت FuelCell Energy Solutions, FCES آلمان
۶۹.....	۴-۴-۲- شرکت Franco Cell فرانسه
۷۱.....	۵-۴-۲- شرکت Cosia (Canadas oil sands innovation alliance)
۷۱.....	۵-۲- پیل‌های سوختی ممبران تبادل پروتونی (PEMFC)
۷۵.....	۱-۵-۲- الزامات سیستمی
۷۵.....	۱-۱-۵-۲- سیستم تامین سوخت
۷۶.....	۲-۱-۵-۲- سیستم تامین هوا
۷۶.....	۳-۱-۵-۲- سیستم مدیریت آب
۷۶.....	۴-۱-۵-۲- سیستم مدیریت حرارتی
۷۷.....	۵-۱-۵-۲- سیستم کنترل عملکرد

۷۷	۲-۵-۲- طراحی PEM.....
۷۸	۲-۵-۲-۱- الکترولیت.....
۷۸	۲-۵-۲-۲- الکترودها.....
۷۹	۲-۵-۲-۳- صفحات دوقطبی.....
۷۹	۲-۵-۲-۴- سیلنت‌ها.....
۸۰	۲-۵-۳- شرکت‌های تولید کننده و محصولات تجاری.....
۸۶	فصل ۳.....
۸۷	۳-۱- الزامات کلی.....
۸۹	۳-۲- مخاطرات مربوط به نصب و راه‌اندازی پیل سوختی.....
۸۹	۳-۲-۱- مخاطرات پیل‌های سوختی نسبت به هیدروژن.....
۹۰	۳-۲-۲- مخاطرات آتش‌سوزی و انفجار.....
۹۱	۳-۲-۳- خواص و مشخصه‌های هیدروژن.....
۹۲	۳-۲-۴- تمایل به نشستی.....
۹۲	۳-۲-۴-۱- ویسکوزیته پایین.....
۹۲	۳-۲-۴-۲- نفوذپذیری بسیار بالا.....
۹۳	۳-۲-۴-۳- شناوری بالا.....
۹۳	۳-۲-۵- تمایل به ایجاد شکنندگی.....
۹۳	۳-۲-۶- تمایل به احتراق.....
۹۳	۳-۲-۶-۱- بازه گسترده اشتعال‌پذیری.....
۹۴	۳-۲-۶-۲- انرژی احتراق بسیار پایین.....
۹۴	۳-۲-۶-۳- احتراق خود به خود.....
۹۴	۳-۲-۷- پیامدهای آتش‌سوزی / انفجار.....
۹۴	۳-۲-۷-۱- شعله نامرئی.....
۹۴	۳-۲-۷-۲- سرعت سوختن سریع.....
۹۵	۳-۲-۷-۳- امکان انفجار.....
۹۶	فصل ۴.....
۹۷	۴-۱- استاندارد NFPA 853.....
۹۷	۴-۲- استاندارد NFPA 70.....

۹۸.....	ANSI/CSA AMERICA FC 1-2004 استاندارد ۳-۴
۹۸.....	IEEE 1547 استاندارد ۴-۴
۹۸.....	IEEE Standard 1547 (2003)-۱-۴-۴
۹۹.....	IEEE Standard 1547.1 (2005)-۲-۴-۴
۹۹.....	IEEE Standard 1547.2 (2008)-۳-۴-۴
۹۹.....	IEEE Standard 1547.3 (2007)-۴-۴-۴
۱۰۰.....	IEEE Standard 1547.4 (2011)-۵-۴-۴
۱۰۰.....	IEEE Standard 1547.6 (2011)-۶-۴-۴
۱۰۰.....	IEEE Standard 1547.7 (2013)-۷-۴-۴
۱۰۰.....	IEEE Standard P1547.8-۸-۴-۴
۱۰۰.....	IEEE Standard 1547a (2014)-۹-۴-۴
۱۰۱.....	IEEE Standard P1547.1a-۱۰-۴-۴
۱۰۱.....	UL 1741 استاندارد ۵-۴
۱۰۲.....	استانداردهای تکمیلی ۶-۴
۱۰۴.....	فصل ۵
۱۰۵.....	۱-۵- استانداردهای بین‌المللی مربوط به پیل‌های سوختی
۱۱۷.....	فصل ۶
۱۱۹.....	۱-۶- سند راهبرد ملی و توسعه فناوری پیل سوختی کشور
۱۲۰.....	۱-۶-۱- راهبردها
۱۲۱.....	۱-۶-۲- اقدامات
۱۲۴.....	۱-۶-۳- ترتیبات اجرایی
۱۲۶.....	فصل ۷
۱۲۷.....	۱-۷- استانداردهای ملی مرتبط با فن‌آوری پیل سوختی ثابت
۱۲۸.....	فصل ۸
۱۳۱.....	مراجع

فهرست شکل‌ها

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
شکل ۱-۱: شماتیکی از ساختار پیل سوختی [۱].....	۲
شکل ۱-۲: سیستم ترکیبی توان-حرارت پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از گاز طبیعی شرکت SULZER [۵].....	۸
شکل ۲-۲: گستره‌ای از سوخت‌های مورد استفاده برای پیل سوختی اکسید جامد [۵].....	۹
شکل ۳-۲: نمایی از دستگاه پیل سوختی اکسید جامد با سوخت گاز سیلندری [۵].....	۱۱
شکل ۴-۲: دو امکان استفاده از ریفورمینگ داخلی در پیل سوختی اکسید جامد [۵].....	۱۲
شکل ۵-۲: شماتیکی از ریفورمینگ خارجی مورد استفاده برای پیل سوختی غشای پلیمری [۵].....	۱۲
شکل ۶-۲: جریان گرمایی در ریفورمینگ داخلی پیل سوختی اکسید جامد که جذب گرما توسط ریفورمر داخلی انجام می‌گیرد.....	۱۳
شکل ۷-۲: بازده بالای پیل سوختی اکسید جامد نسبت به سایر منابع تولید توان.....	۱۴
شکل ۸-۲: انواع پیل سوختی اکسید جامد. A: صفحه‌ای، B: لوله‌ای و C: مونولیتیک.....	۱۴
شکل ۹-۲: اجزاء تشکیل دهنده یک سلول صفحه‌ای.....	۱۵
شکل ۱۰-۲: استک از نوع SOFC صفحه‌ای.....	۱۶
شکل ۱۱-۲: انواع ساختارهای جریان گاز برای پیل‌های سوختی نوع مسطح.....	۱۷
شکل ۱۲-۲: شماتیکی از عملکرد یک پیل صفحه‌ای ترکیبی.....	۱۸
شکل ۱۳-۲: نحوه تولید توان الکتریکی در یک پیل اکسید جامد لوله‌ای.....	۱۹
شکل ۱۴-۲: طراحی جدید پیل اکسید جامد لوله‌ای به صورت لوله‌های با مقطع بیضی شکل.....	۱۹
شکل ۱۵-۲: استک از نوع SOFC لوله‌ای [۴].....	۲۰
شکل ۱۶-۲: استک از نوع SOFC مونولیتیک.....	۲۱
شکل ۱۷-۲: شماتیک پیل سوختی اکسید جامد مونولیتیک.....	۲۱
شکل ۱۸-۲: شماتیک و تصویر یک SOFC مونولیتیک لانه زنبوری.....	۲۳
شکل ۱۹-۲: شماتیک پیل سوختی پر شده با الیاف از جنس الکترودها.....	۲۳
شکل ۲۰-۲: نمایی از یک ساختار مونولیتیک لانه زنبوری شامل دو بخش الکترولیت و اتصال دهنده (پس از زینترینگ) ۲۳	
شکل ۲۱-۲: نحوه عملکرد پیل سوختی با مبدل داخلی.....	۲۴
شکل ۲۲-۲: توان پیل‌های سوختی اکسید جامد صفحه‌ای ساخته شده توسط موسسات مختلف.....	۲۵
شکل ۲۳-۲: تعداد کلی واحدهای نصب شده پیل سوختی اکسید جامد بر حسب نوع کاربریشان [۸].....	۲۷

- شکل ۲-۲۴: واحد ۵ کیلووات برای تامین برق ساخت شرکت ACUMENTRICS..... ۳۱
- شکل ۲-۲۵: استک‌های ساخته شده توسط شرکت MSRI [۳]..... ۳۲
- شکل ۲-۲۶: استک ۱ کیلووات ساخت شرکت ZTEC..... ۳۲
- شکل ۲-۲۷: سیستم ترکیبی SOFC با چیلر جذبی..... ۳۳
- شکل ۲-۲۸: شمای کلی سیستم هیبرید ۲۰۰ کیلووات SOFC با توربین گاز [۱۲]..... ۳۴
- شکل ۲-۲۹: پیل سوختی اکسید جامد ساخت شرکت TMI..... ۳۴
- شکل ۲-۳۰: استک‌های ساخته شده توسط شرکت TMI..... ۳۵
- شکل ۲-۳۱: نمونه ۷۵ وات ساخته شده برای تولید برق توسط شرکت MESOSCOPIC DEVICES..... ۳۶
- شکل ۲-۳۲: استک یک کیلوواتی ساخت SOFCO..... ۳۷
- شکل ۲-۳۳: نمای کلی سل و استک‌های ساخته شده توسط HONEYWELL..... ۳۸
- شکل ۲-۳۴: شماتیک سیستم ۵ کیلووات ساخت شرکت HONEYWELL..... ۳۸
- شکل ۲-۳۵: طراحی انجام شده توسط GLOBAL THERMOELECTRIC برای استک SOFC صفحه‌ای [۱۳]..... ۳۹
- شکل ۲-۳۶: مراحل توسعه استک در شرکت VERSA POWER SYSTEM..... ۳۹
- شکل ۲-۳۷: استک‌های ساخته و نصب شده توسط FZJ در نقاط مختلف جهان [۲]..... ۴۱
- شکل ۲-۳۸: نوع HPD و لوله‌ای ساخته شده توسط SIEMENS-WESTINGHOUSE..... ۴۱
- شکل ۲-۳۹: سیستم ترکیبی ۱۰۰ کیلووات SOFC..... ۴۲
- شکل ۲-۴۰: واحد ترکیبی ۲۵۰ کیلوواتی [۲۳]..... ۴۲
- شکل ۲-۴۱: شکل کلی سیستم ترکیبی یک مگاواتی SOFC شرکت ROLLS ROYCE [۲۴]..... ۴۳
- شکل ۲-۴۲: مشخصات مدل 1000 N سیستم GALILEO..... ۴۴
- شکل ۲-۴۳: نمای کلی و مشخصات واحد ۲۰ کیلوواتی ساخت WARTSILA [۲۶]..... ۴۵
- شکل ۲-۴۶: سیستم یک کیلووات CHP پیل سوختی اکسید جامد ساخت کمپانی NIPPON-SHOKUBAI CO., LTD..... ۴۶
- [۲۷]..... ۴۶
- شکل ۲-۴۵: سیستم ۲۵ کیلووات ساخت CFCL..... ۴۷
- شکل ۲-۴۶: سیستم ۱ کیلووات GENNEX ساخت CFCL [۲۸]..... ۴۸
- شکل ۲-۴۷: عملکرد پیل سوختی اسید فسفریک [۱۱]..... ۵۱
- شکل ۲-۴۸: آمار مصارف گوناگون پکیج‌های PAFC 100 KW شرکت FUJI [۱۶]..... ۵۵
- شکل ۲-۴۹: مشخصات پکیج جدید PAFC 100 KW شرکت FUJI (FP-100i) [۱۶]..... ۵۵
- شکل ۲-۵۰: راندمان تولید برق و بازیابی حرارت پیل سوختی PAFC بر حسب توان خروجی شرکت FUJI..... ۵۶

- شکل ۵۱-۲: توان خروجی پیل سوختی PAFC بر حسب ساعت روز شرکت FUJI..... ۵۶
- شکل ۵۲-۲: شماتیک سیستم PC 25..... ۵۷
- شکل ۵۳-۲: شماتیکی از واحد تولید توان ۲۰۰ KW پیل سوختی PC25 شرکت UTC [۱۹]..... ۵۹
- شکل ۵۴-۲: مقایسه میزان انتشار نیروگاه PAFC 200 KW شرکت IFC با سوخت گاز طبیعی (سال ۱۹۹۵) [۲۱] ۶۰
- شکل ۵۵-۲: نحوه عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب..... ۶۲
- شکل ۵۶-۲: استفاده از پیل سوختی کربنات مذاب در نیروگاه خانگی..... ۶۳
- شکل ۵۷-۲: استفاده از پیل سوختی کربنات مذاب در کشتی‌ها..... ۶۳
- شکل ۵۸-۲: شماتیکی از فرآیند پیل سوختی کربنات مذاب..... ۶۴
- شکل ۵۹-۲: جداسازی دی‌اکسید کربن در پیل سوختی کربنات مذاب..... ۶۵
- شکل ۶۰-۲: : سیستم ترکیبی تولید توان، حرارت و هیدروژن..... ۶۶
- شکل ۶۱-۲: نمونه‌هایی از محصولات شرکت FUELCELL ENERGY, FCE (USA)..... ۶۷
- شکل ۶۲-۲: بزرگترین واحد تولید توان پیل سوختی در جهان (۵۹ MW) در شهر HWASEONG کره جنوبی..... ۶۹
- شکل ۶۳-۲: منبع تولید توان چند مگاواتی با بازده الکتریکی ۵۶٪ با سوخت اتانول و میزان انتشار NOX و SO2 برابر صفر..... ۷۰
- شکل ۶۴-۲: راه‌حل‌های شرکت FRANCO CELL برای تولید توان با استفاده از انرژی‌های پاک..... ۷۱
- شکل ۶۵-۲: شماتیک پیل سوختی با ممبران تبادل پروتونی..... ۷۳
- شکل ۶۶-۲: شماتیک استک پیل سوختی تبادل پروتونی..... ۷۴
- شکل ۶۷-۲: پیل سوختی خنک شونده با هوا..... ۷۸
- شکل ۶۸-۲: سلول‌های سوختی PEM شرکت NEDSTACK..... ۸۱
- شکل ۶۹-۲: مشخصات محصولات تولیدی شرکت BALLARD و کاربردهای آنها..... ۸۳
- شکل ۷۰-۲: استک پیل سوختی FCGEN®-1020ACS..... ۸۴
- شکل ۷۱-۲: استک‌های پیل سوختی NUVERA..... ۸۵
- شکل ۱-۳: شماتیکی از الزامات کلی نصب یک سیستم پیل سوختی در یک ساختمان تجاری [۲۹]..... ۸۷
- شکل ۱-۴: شماری از موارد ایمنی بر اساس استاندارد ANSI/CSA FC 1-2004..... ۹۸

فهرست جداول

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
جدول ۱-۲: مقایسه انواع پیل‌های سوختی [۱].....	۶
جدول ۲-۲: انواع سوخت‌های گازی مورد استفاده برای پیل سوختی اکسید جامد و خواص آنها [۴].....	۹
جدول ۳-۲: خصوصیات کلی گاز طبیعی [۴].....	۱۰
جدول ۴-۲: مقایسه‌ای بین دو نوع متداول پیل سوختی اکسید جامد.....	۱۵
جدول ۵-۲: موسسات توسعه دهنده پیل سوختی اکسید جامد در اروپا [۶].....	۲۸
جدول ۶-۲: موسسات توسعه دهنده پیل سوختی اکسید جامد در آمریکای شمالی [۶].....	۲۹
جدول ۷-۲: موسسات توسعه دهنده پیل سوختی اکسید جامد در آسیا [۶].....	۳۰
جدول ۸-۲: برنامه SECA برای توسعه پیل سوختی اکسید جامد [۲].....	۳۰
جدول ۹-۲: موسسات توسعه دهنده SOFC در اروپا [۶].....	۴۰
جدول ۱۰-۲: خصوصیات و ویژگی‌های پیل‌های سوختی اسید فسفریک.....	۵۲
جدول ۱۱-۲: مشخصه‌های راندمان عملیاتی و ویژگی‌های پیل سوختی PC25 250 KW نیروگاه شرکت UTC [۲۱].....	۶۰
جدول ۱۲-۲: مشخصات محصولات شرکت NEDSTACK.....	۸۲
جدول ۱-۳: شرایط نصب واحد تولید توان پیل سوختی با کاربرد ساکن.....	۸۸
جدول ۲-۳: ویژگی و مشخصه‌های هیدروژن، گاز طبیعی خشک و پروپان گازی [۳۷].....	۹۱
جدول ۱-۵: کدها و استانداردهای مربوط به نصب پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن [۲۹].....	۱۰۷
جدول ۲-۵: کدها و استانداردهای تاسیسات پیل سوختی [۲۹].....	۱۰۸
جدول ۱-۸: پروژه‌های واگذار شده از طرف کمیته راهبری پیل سوختی.....	۱۲۹
جدول ۲-۸: استانداردهای تدوین شده در مورد پیل سوختی در داخل کشور.....	۱۳۰

مقدمه

استفاده گسترده از هیدروژن به عنوان منبع انرژی می‌تواند به نگرانی در مورد امنیت انرژی، تغییرات اقلیمی جهانی و کیفیت هوا کمک کند. چنین سوختی می‌تواند جایگزینی پاک‌تر و کارآمدتر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی مانند بنزین و گازوئیل و غیره باشد. هیدروژن می‌تواند با استفاده از فن‌آوری‌های مختلف تولید گردد و همچنین می‌تواند با ذخیره‌سازی برای فن‌آوری‌های تجدیدپذیر در فصل‌های مختلفی مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از این سوخت در فرآیندهای احتراق و پیل‌های سوختی، طیف گسترده‌ای از خدمات انرژی موردنیاز از قبیل روشنایی، حمل و نقل، گرمایش، سرمایش و پخت و پز را می‌توان فراهم نمود [۴-۱].

هدف از تدوین استاندارد و مقررات برای پیل‌های سوختی، استفاده از تکنولوژی پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن در ساختمان‌ها، فضاهای محصور و فضاهای باز می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، مقررات، مجوزها و معیارهای اطلاعاتی در مورد فرآیندهای نظارتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و مفاد کدهای مربوطه و استانداردها فراهم شده است که بر روی طراحی، مستقر کردن، تایید، نصب، بهره‌برداری و تعمیرات تکنولوژی پیل سوختی تاثیرگذار می‌باشد. این کار به عنوان یک ابزار برای تعیین کدها و استانداردهای قابل اجرا برای تاسیسات سیستم‌های پیل سوختی با کاربرد ساکن است که تامین برق ساختمان‌های مسکونی و تجاری را برعهده دارند و همچنین ممکن است گرمای مضاعفی را تولید کنند که می‌تواند سایر انرژی‌های موردنیاز از جمله گرمایش ساختمان را نیز تامین کند.

فصل ۱

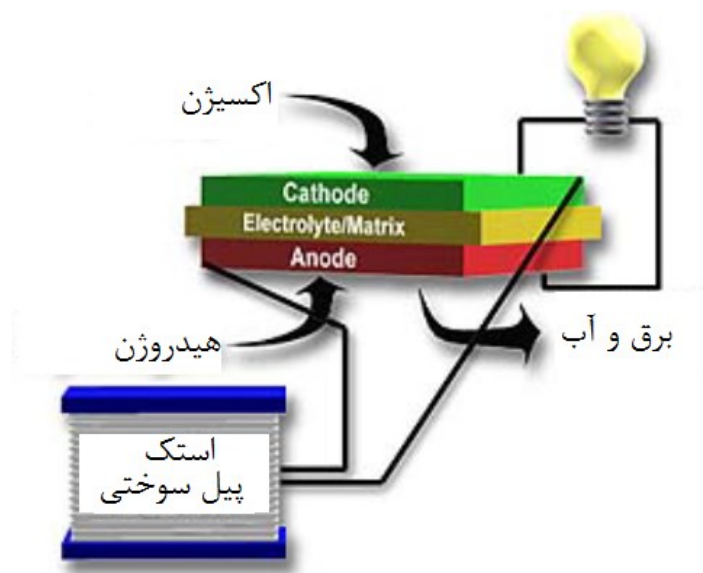
تعاریف و اصطلاحات مرتبط با پیل

سوختی

۱-۱- اصول پیل سوختی

پیل سوختی یک دستگاه الکتروشیمیایی است که از هیدروژن و اکسیژن برای تولید برق، حرارت و همچنین آب استفاده می‌کند. شماتیکی از پیل سوختی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. هیدروژن می‌تواند از انواع سوخت هیدروکربنی مانند گاز طبیعی، بنزین، دیزل یا متانول تولید گردد و اکسیژن از هوای پیرامون پیل سوختی تامین می‌گردد. از آنجا که پیل‌های سوختی دستگاه‌های الکتروشیمیایی هستند و بدون انجام عمل احتراق کار می‌کنند، بنابراین گازهای آلاینده احتراقی را تولید نمی‌کنند [۱].

یک پیل سوختی می‌تواند در راندمان بالا عمل کند و فرصتی را برای جذب گرما و استفاده از آن که توسط فرایند تولید می‌شود، فراهم کند. در پیل سوختی از اجزاء متحرک استفاده نشده است و در نتیجه یک منبع آرام و قابل اعتماد از توان، برق، گرما و آب است [۱].



شکل ۱-۱: شماتیکی از ساختار پیل سوختی [۱]

تجهیزات پیل سوختی شامل مجموعه‌ای از سل‌های پیل‌های سوختی می‌باشد که یک استک پیل سوختی را ایجاد می‌کنند. چنین مجموعه‌هایی به عنوان قلب تجهیزات پیل‌های سوختی یا واحدهای تولید توان می‌باشند. علاوه بر این، پیل‌های سوختی ممکن است یک بخش فرآوری سوخت به صورت جداگانه یا یکپارچه در استک پیل سوختی داشته باشند که از سوخت‌های هیدروکربنی شامل گاز طبیعی، متانول و غیره در تولید توان استفاده کنند. جایی که جریان متناوب (AC) مورد نیاز است، یک بخش تبدیل توان برای تبدیل جریان مستقیم (DC) تولید شده توسط پیل سوختی به جریان متناوب (AC) وجود خواهد داشت. تجهیزات پیل سوختی با کاربرد ساکن می‌توانند به صورت یکپارچه در یک سیستم واحد، مدولار یا ساخته شده در محل نصب طبقه بندی شوند [۱-۲].

به طور کلی، یک سیستم پیل سوختی شامل قسمت‌های فرآوری سوخت، استک پیل سوختی (مجموعه‌ای از سل‌های پیل سوختی که هرکدام از سل‌ها شامل الکتروود، الکترولیت و اکسید کننده می‌باشند) و تجهیزات تبدیل توان می‌باشد. در ادامه هرکدام از قسمت‌های پیل سوختی شرح داده شده‌اند [۱-۲].

۲-۱- فرآوری سوخت

اساس کار قسمت فرآوری سوخت یا ریفرمینگ، فراهم نمودن سوخت هیدروژنی نسبتاً خالص برای پیل سوختی می‌باشد که با استفاده از سوختی که به راحتی در دسترس است و یا قابل حمل است تامین می‌گردد. هیدروژن از هر نوع سوخت هیدروکربنی مانند گاز طبیعی، گاز مایع و یا حتی سوخت دیزل می‌تواند تامین شود. فرآیند ریفرمینگ اصطلاحی کلی است که به فرایند تبدیل سوخت‌های مایع یا گازهای سبک هیدروکربنی به هیدروژن و مونوکسید کربن گفته می‌شود. روش‌هایی برای ریفرمینگ سوخت استفاده می‌شود. سه روش تجاری و پیشرفته شامل ریفرمینگ با بخار آب، ریفرمینگ اکسیداسیون جزئی و ریفرمینگ اتوترمال می‌باشد. این فرایندها شامل گرم کردن سوخت‌های هیدروکربنی به نقطه تبخیر و سپس تزریق بخار سوپرهیتر برای کمک به انجام واکنش ریفرمینگ است. منبع حرارتی برای تامین گرمای مورد نیاز واکنش، معمولاً یک کوره حرارت بالا است که بخشی از سوخت ورودی و یا خروجی سوخت از پیل سوختی را می‌سوزاند و حرارت لازم را تامین می‌کند. گرمای خروجی از سیستم پیل سوختی نیز می‌تواند به عنوان منبع گرما استفاده شود. ریفرمینگ سوخت‌های غنی از هیدروکربن اغلب کامل نیست و گازهایی مانند مونوکسید کربن از میان فرآیند ریفرمینگ تولید می‌گردد. این گازها توسط کاتالیست می‌توانند به آب و دی‌اکسید کربن تبدیل گردند.

۳-۱- الکترودها

گاز غنی از هیدروژن حاصل از فرآیند ریفرمینگ (یا در صورت استفاده مستقیم از هیدروژن ذخیره‌سازی شده در سایت) به طور مداوم به الکترودها (که در آن واکنش الکتروشیمیایی برای تولید جریان الکتریکی رخ می‌دهد) تزریق می‌شود. همانند یک باتری، دو الکتروود آند و کاتد برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴-۱- الکتروود آند

در سمت آند پیل سوختی، الکترون‌ها از مولکول‌های هیدروژن جدا شده تا بتوانند در یک مدار خارجی وارد گردند. آند با استفاده از کانال‌هایی که گاز هیدروژن را به طور مساوی بر روی سطح کاتالیزور پراکنده می‌کنند، با گرفتن الکترون از مولکول‌های هیدروژنی، آنها را به یون‌های مثبت تبدیل می‌کند و در نتیجه الکترون‌های منفی آزاد شده، وارد مدار خارجی

می‌گردند و تولید انرژی الکتریکی می‌کنند. سپس در پیل‌های سوختی اکسید جامد با انتقال یون‌های منفی اکسیژن از طریق الکترولیت به سمت آند، این یون‌ها با یون‌های مثبت هیدروژن واکنش داده و تولید آب می‌کنند.

۱-۵- الکترود کاتد

کاتد پیل سوختی نیز با داشتن کانال‌هایی، تأمین مداوم اکسیژن را از هوا بر روی سطح کاتالیزور فراهم می‌کند. الکترون‌ها از مدار خارجی به کاتالیست کاتد انتقال می‌یابند و در سمت کاتد این الکترون‌ها با مولکول‌های اکسیژن واکنش داده و یون‌های منفی اکسیژن را تشکیل می‌دهند.

۱-۶- الکترولیت

الکترولیت در پیل‌های سوختی اکسید جامد، یون‌های منفی اکسیژن را به سمت آند هدایت نموده که در سمت آند با مولکول‌های هیدروژن واکنش داده و الکترون‌های آزاد را تولید می‌کنند. در نتیجه الکترولیت‌ها نقش کامل‌کننده چرخه تولید الکتریسیته را برعهده دارند. همچنین به عنوان یک انسدادکننده از عبور جریان‌های سوخت و اکسیژن به طرف‌های دیگر و در نتیجه ترکیب شدن این جریان‌ها جلوگیری می‌کنند.

۱-۷- استک پیل سوختی

جهت افزایش ولتاژ پیل‌های سوختی، تعدادی از سل‌های پیل سوختی می‌توانند با یکدیگر یکپارچه شده و استک پیل سوختی را ایجاد کنند. به عبارتی ساده، سل‌های بیشتر در یک استک و استک‌های بیشتر در یک تجهیز، می‌تواند توان خروجی بزرگتری را ایجاد کند. اصطلاح چگالی توان استک بیان می‌کند که چه مقدار توان به ازای سطح داده شده تولید می‌شود.

۱-۸- تجهیزات مبدل توان

سیستم پیل سوختی می‌تواند هر دو جریان DC و یا AC را فراهم کند. تبدیل توان برای یک واحد پیل سوختی جهت تأمین جریان الکتریکی DC موردنیاز تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرد که این سیستم‌های تبدیل توان، جریان و ولتاژ را کنترل می‌کنند. تبدیل توان برای یک واحد پیل سلولی، جهت تأمین جریان الکتریکی AC موردنیاز تجهیزات می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که این سیستم‌ها دارای متناوب‌ساز جریان الکتریکی هستند و جریان DC را به جریان AC تبدیل می‌کنند.

فصل ۲

بررسی و مرور پیشینه پیل سوختی و
کاربرد آن

۲-۱- انواع پیل‌های سوختی و کاربرد آنها؛ محصولات تجاری

چهار نوع اصلی سیستم پیل سوختی در تجهیزات پیل سوختی با کاربرد ساکن که در ساختمان‌های مسکونی و تجاری نصب گردیده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سیستم‌های پیل سوختی در زیر عنوان شده‌اند [۱]:

- پیل سوختی کربنات مذاب (Molten Carbonate)
- پیل سوختی اسید فسفریک (Phosphoric Acid)
- پیل سوختی پلیمری (Proton Exchange Membrane)
- پیل سوختی اکسید جامد (Solid Oxide Fuel Cell)

پیل‌های سوختی بر اساس نوع الکترولیت به کار رفته در آنها کلاس‌بندی می‌شوند. الکترولیت، نوع واکنش‌های شیمیایی که در پیل سوختی رخ می‌دهد، نوع کاتالیزورهای مورد نیاز، محدوده دما که در آن پیل سوختی عمل می‌کند، سوخت مورد نیاز و سایر عوامل دیگر را تعیین می‌کند. این ویژگی‌ها به نوبه خود، بر کارکرد و شرایط عملیاتی مورد نیاز که برای انواع پیل‌های سوختی مناسب هستند، تاثیر می‌گذارد. جدول ۲-۱ مقایسه‌ای بین چهار پیل سوختی مذکور را ارائه می‌دهد.

جدول ۲-۱: مقایسه انواع پیل‌های سوختی [۱]

پارامتر	SOFC	PEMFC	PAFC	MCFC
الکترولیت	اکسید فلز جامد	غشای تبادل یونی	اسید فسفریک مایع	نمک کربنات گداخته
دمای عملیاتی	۶۰۰ - ۱۰۰۰ °C	۶۰ - ۱۰۰ °C	۱۵۰ - ۲۰۰ °C	۶۰۰ - ۱۰۰۰ °C
فراورش	داخلی / خارجی	خارجی	خارجی	داخلی / خارجی
اکسید کننده	هوا / O ₂	هوا / O ₂	هوا / O ₂	هوا / O ₂ / CO ₂
بازده (بدون در نظر گرفتن بازایی حرارتی)	۴۵-۶۰٪	۳۵-۵۰٪	۳۵-۵۰٪	۴۵-۶۰٪
بازده (با در نظر گرفتن بازایی حرارتی)	۸۵٪	۶۰٪	۸۰٪	۸۵٪
ماکزیمم توان خروجی	۲۲۰ KW	۲۵۰ KW	۱ MW	۲ MW
استفاده از حرارت اضافی	گرم کردن آب یا تولید بخار آب	گرم کردن فضا یا گرم کردن آب	گرم کردن فضا یا گرم کردن آب	تولید بخار آب با فشار بالا

در ادامه انواع پیل‌های سوختی به طور مختصر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۱-۱- پیل سوختی اکسید جامد

پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFC) یک لایه نازک از اکسید زیرکونیوم را به عنوان الکترولیت سرامیکی جامد استفاده می‌کنند و شامل یک کاتد منگنات لانتانیم و آند نیکل - زیرکونیا هستند. این پیل‌های سوختی یک انتخاب مناسب برای کاربردهای انرژی با توان بالا مانند واحدهای صنعتی یا ایستگاه‌های تولید برق مرکزی هستند.

پیل‌های سوختی SOFC در دمای بسیار بالا کار می‌کنند (حدود 1000°C یا 1800°F). عملیات در درجه حرارت بالا نیاز به کاتالیزور فلزات گرانبها را رفع می‌نماید. همچنین این پیل‌های سوختی می‌توانند ریفورمینگ داخلی سوخت را انجام دهند که در این صورت امکان استفاده از انواع سوخت مانند گاز طبیعی، متانول و غیره را فراهم می‌کنند و هزینه‌های مرتبط با افزودن واحد ریفورمینگ به سیستم را کاهش می‌دهند [۲-۱].

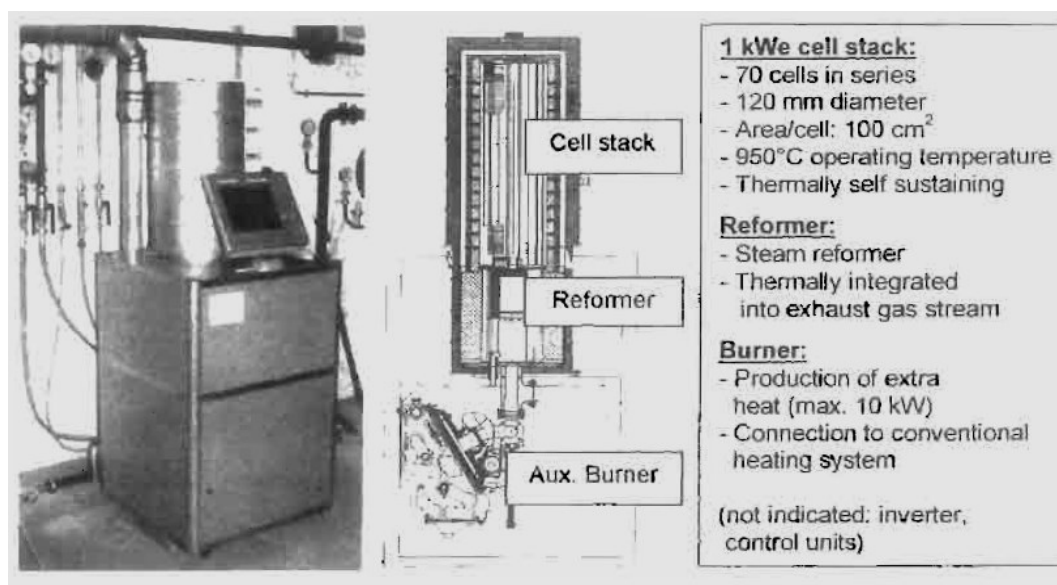
SOFC ها نوعی از پیل‌های سوختی مقاوم به حضور گوگرد در سوخت و مونوکسید کربن هستند. در نتیجه، پیل‌های سوختی SOFC می‌توانند از گازهای تولید شده از زغال سنگ یا سایر سوخت‌های فسیلی که در اثر سوختن گازهای سوختی را تولید می‌کنند، استفاده کنند.

عملیات در دمای بالای پیل‌های سوختی اکسید جامد معایبی دارد. فرآیند گرم شدن پیل سوختی به آهستگی شروع می‌شود و نیاز به محافظت حرارتی هم برای حفظ گرما و هم برای حفاظت از کارکنان دارد. بنابراین چنین پیل‌هایی می‌توانند برای کاربردهای ساکن مناسب باشند و در کاربردهای حمل و نقلی و در مقیاس کوچک قابل حمل کمتر مورد استفاده قرار گیرند. درجه حرارت عملیاتی بالا، شرایط پایداری و ماندگاری سختی را برای مواد مورد استفاده در ساخت این پیل‌ها ایجاد می‌کند. توسعه تکنولوژی با هزینه کم و دوام بالا در دمای عملکرد پیل سوختی، چالش فنی اصلی این تکنولوژی است.

پیل‌های سوختی SOFC بدون فشار که در حال حاضر در دسترس هستند بازده الکتریکی در محدوده ۴۵٪ را فراهم می‌کنند. طی تحقیقات انجام گرفته، سیستم‌های پیل سوختی تحت فشار می‌توانند بازده ۶۰٪ را داشته باشند. با به کارگیری حرارت اضافی سیستم در کاربردهای دیگر مانند گرم کردن آب یا تولید بخار آب، بازده تولید توان این سیستم‌ها می‌تواند از ۶۰ درصد به ۸۵٪ نیز برسد [۳-۲].

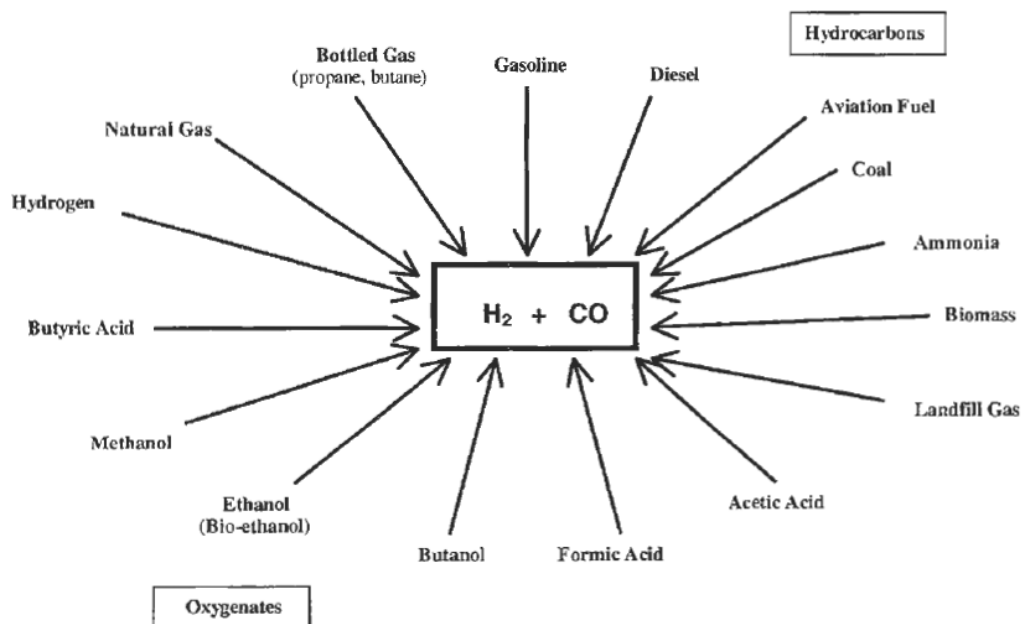
این نوع پیل‌های سوختی، راکتورهای الکتروشیمیایی هستند که به طور مستقیم انرژی شیمیایی سوخت‌های گازی مانند هیدروژن و گاز طبیعی را طی فرآیند الکتروشیمیایی به انرژی الکتریکی با کارایی بالا و سازگار با محیط زیست تبدیل می‌کنند و دارای مزیت‌های منحصربه‌فردی نسبت به تکنولوژی‌های تولید توان سنتی می‌باشند. به علت دمای عملیاتی بالا، پیل‌های سوختی اکسید جامد می‌توانند علاوه بر تولید توان الکتریکی، آب گرم یا بخار آب نیز تولید کنند و یا به میکروتوربین‌ها یا توربین‌های گازی برای تولید توان الکتریکی که کارایی سیستم و گستره کاربردی آن را ارتقا می‌دهد، متصل گردند [۴].

سیستم‌های ترکیبی توان - حرارت می‌توانند در گستره ۱ کیلووات تا چندین مگاوات کاربرد داشته باشند که برای کاربردهای خانگی کوچک تا بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای چنین کاربردهایی، ماندگاری طولانی مدت سیستم فرآوری سوخت یک احتیاج کلیدی می‌باشد. شکل ۱-۲ نمایی از طرح فرآوری سوخت برای سیستم ترکیبی توان - حرارت پیل سوختی اکسید جامد شرکت Sulzer را با سوخت گاز طبیعی نشان می‌دهد [۵].



شکل ۱-۲: سیستم ترکیبی توان-حرارت پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از گاز طبیعی شرکت Sulzer [۵]

سوخت این سیستم‌ها می‌تواند شامل گستره هیدروژن و مونوکسید کربن تا هیدروکربن‌ها و زغال سنگ گازی شده گردد [۶]. انعطاف‌پذیری در انتخاب سوخت و به ویژه توانایی استفاده مستقیم از سوخت‌های هیدروکربنی در عملیات پیل‌های سوختی اکسید جامد و همچنین ساختار مدولار پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد را سیستمی ایده‌آل برای کاربردهای با مقیاس کوچک تا بزرگ و همچنین کاربردهای متحرک ساخته است [۵]. در شکل ۲-۲، گستره‌ای از سوخت‌های مورد استفاده در پیل سوختی اکسید جامد نشان داده شده است [۵].



شکل ۲-۲: گستره‌ای از سوخت‌های مورد استفاده برای پیل سوختی اکسید جامد [۵]

انواع سوخت‌های مورد استفاده برای پیل سوختی اکسید جامد گازی و خصوصیات مربوط به آنها در جدول ۲-۲ آورده شده است. از میان سوخت‌های گازی، رایج‌ترین آنها گاز طبیعی و همچنین پروپان و بوتان می‌باشند. در جدول ۳-۲ خصوصیات کلی گاز طبیعی بیان شده است [۴].

جدول ۲-۲: انواع سوخت‌های گازی مورد استفاده برای پیل سوختی اکسید جامد و خواص آنها [۴]

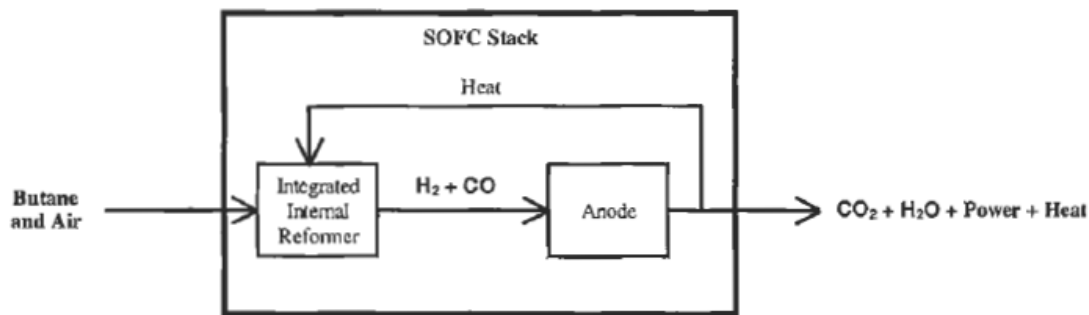
نوع سوخت	وزن مولکولی	نقطه جوش	دمای اشتعال	LHV (kJ/mol)	HHV (kJ/mol)	مقدار اشتعال در هوا (%v/v)
متان	۱۶/۰	-۱۶۱/۵	۴۸۲-۶۳۲	۷۹۹/۷	۸۸۹/۳	۵/۰-۱۵/۰
اتان	۳۰/۱	-۸۸/۶	۵۱۵	۱۴۲۹/۴	۱۵۶۱/۶	۳/۰-۱۲/۵
اتیلن	۲۸/۰	-۱۰۳/۷	۴۹۰	۱۳۲۰/۳	۱۴۰۸/۲	۲/۸-۲۸/۶
پروپان	۴۴/۱	-۴۲/۱	۴۵۰	۲۰۴۴/۴	۲۲۱۹/۷	۲/۱-۱۰/۱
پروپیلن	۴۲/۱	-۴۷/۷	۴۵۸	۱۹۲۷/۰	۲۰۶۰/۹	۲/۰-۱۱/۱
n-بوتان	۵۸/۱	-۰/۵	۴۰۵	۲۶۵۸/۸	۲۸۷۵/۸	۱/۸۶-۸/۴۱
ایزو-بوتان	۵۸/۱	-۱۱/۷	۴۶۲	۲۶۵۷/۰	۲۸۷۲/۸	۱/۸۰-۸/۴۴
n-پنتن	۷۲/۱	-۶/۰	۴۴۳	۲۵۴۲/۰	۲۷۱۸/۱	۱/۹۸-۹/۶۵
ایزو-پنتن	۷۲/۱	-۶/۹	۴۶۵	۲۴۸۵/۰	۲۷۰۶/۲	۱/۸-۹/۰

جدول ۲-۳: خصوصیات کلی گاز طبیعی [۴]

جرم مولی نسبی	۱۶-۲۰
محتوی کربن (درصد وزنی)	۷۳-۷۵
محتوی هیدروژن (درصد وزنی)	۲۵-۲۷
محتوی اکسیژن (درصد وزنی)	۰-۰/۴
نسبت اتمی هیدروژن به کربن	۳/۵-۴/۰
چگالی نسبی به هوا در 15°C	۰/۶-۱/۵
دمای جوش ($^{\circ}\text{C}$)	-۱۶۲
دمای اشتعال خودبخودی	۵۴۰-۵۶۰
محدوده اشتعال بخار (درصد حجمی)	۵-۱۵
محدوده اشتعال پذیری	۰/۷-۲/۱
مقدار گرمای پایین (kJ/mol)	۹۵۰
غلظت متان (درصد حجمی)	۸۰-۱۰۰
غلظت اتان (درصد حجمی)	۰-۵
غلظت نیتروژن (درصد حجمی)	۰-۱۵
غلظت دی اکسید کربن (درصد حجمی)	۰-۵
غلظت گوگرد (ppmw)	۰-۵

پیل‌های سوختی اکسید جامد در سال‌های اخیر به خاطر کارایی بالا و حساسیت نسبتاً پایین به ناخالصی‌های موجود در سوخت، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. هر دو ویژگی مذکور به دلیل دماهای عملیاتی بالا است که به طراحی سیستم و مواد مورد استفاده وابسته است. برای مثال مونوکسید کربن که به عنوان سمی برای پیل‌های سوختی دما پایین (مانند پیل سوختی غشای پلیمری) می‌باشد و باید هیدروژن خالص مورد استفاده قرار گیرد، می‌تواند به عنوان سوخت برای پیل‌های سوختی اکسید جامد مورد استفاده قرار گیرد. چرا که در دماهای پایین، مونوکسید کربن به خوبی بر روی کاتالیست‌های فلزات گرانبها که به عنوان الکترود مورد استفاده قرار می‌گیرند، جذب می‌گردد در صورتی که در دماهای بالا این اتفاق کمتر صورت می‌پذیرد [۷].

در کاربردهای جابجایی، حمل و نقلی و مقیاس کوچک که فراهم کردن گاز طبیعی دشوار می‌باشد، می‌توان از سیلندر گازی (شامل پروپان/ بوتان) استفاده نمود که مزیت‌های قابل توجهی نسبت به گاز طبیعی دارد. چنین گازهایی می‌توانند با ریفرمینگ داخلی سیستم پیل سوختی اکسید جامد، تبدیل به گاز سنتز شوند. یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد با سوخت بوتان در شکل ۲-۳ نشان داده شده است [۵].



شکل ۲-۳: نمایی از دستگاه پیل سوختی اکسید جامد با سوخت گاز سیلندری [۵]

در استفاده از سوخت‌های هیدروکربنی سنگین‌تر از متان، مسائل مربوط به تشکیل کک و لایه‌های کربنی باید در نظر گرفته شوند، به این دلیل که برای سوخت‌های هیدروکربنی سنگین‌تر، تشکیل کک و لایه کربنی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند و به مرور سیستم غیرفعال و ضعیف می‌گردد. ولی استفاده از این سوخت‌ها در مقایسه با سوخت دیزلی که کارایی پایین و آلودگی بالایی دارد، مناسب‌تر می‌باشد [۵].

سوخت دی‌متیل اتر نیز برای سیستم‌های پیل سوختی اکسید جامد مورد استفاده قرار گرفته است. با وجود اینکه این سوخت در دمای اتاق به صورت گازی می‌باشد، ولی در فشارهای بالاتر از ۳ اتمسفر مایع می‌گردد. ذخیره‌سازی این سوخت آسان می‌باشد و بهتر از گاز هیدروژن کنترل می‌گردد [۵].

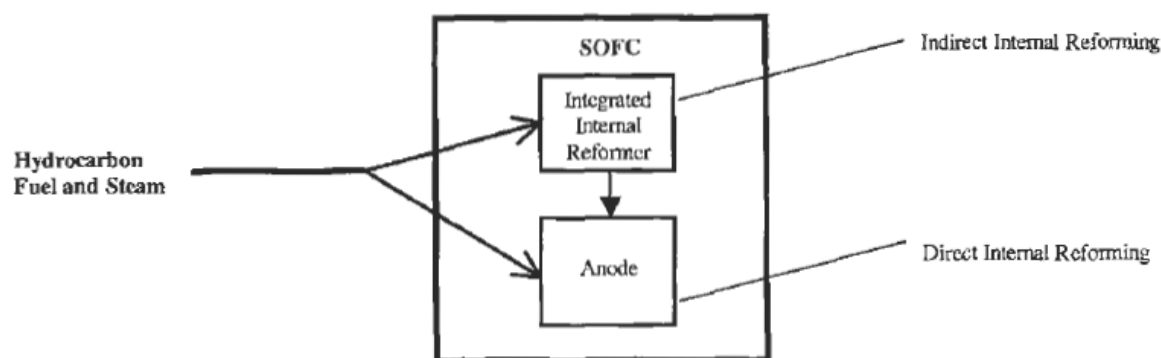
دمای عملیاتی پیل سوختی اکسید جامد نیز بر روی انتخاب سوخت تاثیر دارد. برای دماهای عملیاتی متوسط در نزدیکی ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، متانول سوخت بسیار مناسبی می‌باشد، زیرا در این دماهای عملیاتی گاز طبیعی و هیدروکربن‌های سنگین‌تر به خوبی نمی‌توانند ریفرمینگ شوند و گاز سنتز تولید نمایند. ولی در دماهای بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، متانول به خوبی ریفرم می‌گردد [۵].

با استفاده از ریفرمینگ‌های داخلی، می‌توان از سوخت‌های هیدروکربنی سنگین مانند بنزین و دیزل استفاده نمود. با توجه به این که در ریفرمینگ داخلی در پیل‌های سوختی اکسید جامد، چالش‌هایی مانند تشکیل کک بر روی اجزاء فعال سل می‌تواند رخ دهد، لازم است. برای حل مشکل مذکور، ریفرمرهای خود گرمایی بر اساس کاتالیست‌های فلزی گروه پلاتین توسعه داده شدند که می‌توانند به طور کارآمدی سوخت دیزل را به سوخت هیدروژن با درصد خلوص بالا تبدیل نمایند [۵].

سوخت‌های فیشر- ترپش^۱ که بدون سولفور، مواد آروماتیکی، فلزات و دیگر مواد سمی هستند، می‌توانند برای کاربردهای ریفرمینگ مورد بررسی قرار گیرند و به عنوان سوخت پیل سوختی استفاده شوند [۴].

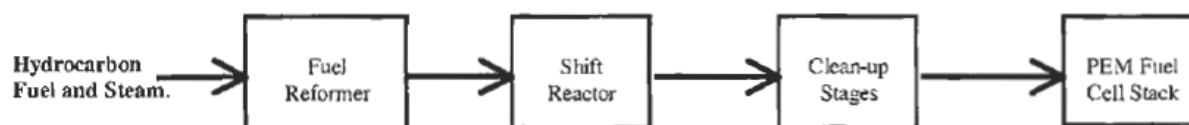
^۱ Fischer- Tropsch Fuels

هنگامی که هیدروکربن‌ها به عنوان منبع سوخت برای پیل‌های سوختی اکسید جامد مورد استفاده قرار گیرند، معمولاً فرض می‌شود که آنها با گاز سنتز که ترکیبی از مونوکسید کربن و هیدروژن می‌باشد، کار کنند. در دماهای عملیاتی نسبتاً بالا این امکان وجود دارد که هیدروکربن‌ها به طور مستقیم در طرف آند و بدون استفاده از ریفورمینگ خارجی مورد استفاده قرار گیرند، زیرا این دماهای عملیاتی همانند دماهای مورد استفاده برای ریفورمینگ گازی می‌باشند که می‌توانند به طور مستقیم، گاز طبیعی را با انجام عملیات ریفورمینگ به گاز سنتز تبدیل کنند. برای انجام ریفورمینگ داخلی سوخت هیدروکربنی دو امکان وجود دارد، یکی استفاده از یک کاتالیست ریفورمینگ سوخت و دیگری انجام ریفورمینگ داخلی در طرف آند سل می‌باشد. این دو امکان در شکل ۴-۲ نشان داده شده است [۵ و ۸]. استفاده از ریفورمینگ داخلی به طور مستقیم در طرف آند سل دارای برتری می‌باشد، زیرا کارایی عملیاتی سیستم را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و همچنین پیچیدگی سیستم را کاهش می‌دهد و در نتیجه هزینه‌های سیستم کاهش پیدا می‌کند [۵].



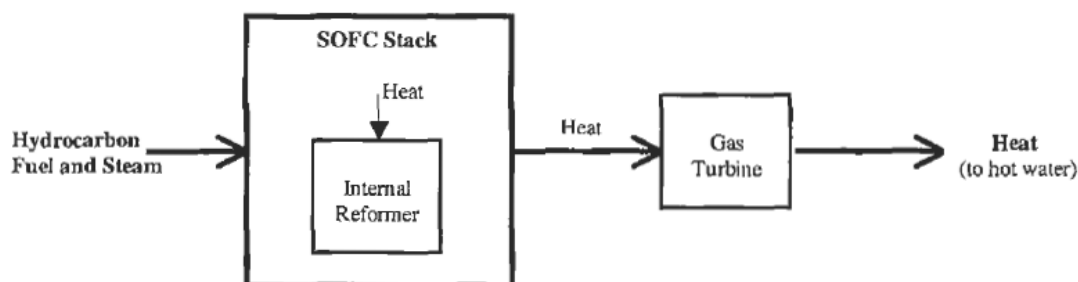
شکل ۴-۲: دو امکان استفاده از ریفورمینگ داخلی در پیل سوختی اکسید جامد [۵]

با توجه به اتلاف و پایین آمدن کارایی که در ریفورمینگ خارجی وجود دارد، استفاده مستقیم از هیدروکربن‌ها می‌تواند عملیات پیل سوختی را ساده‌تر نماید و به طور قابل توجهی باعث افزایش کارایی و کاهش هزینه سیستم پیل سوختی اکسید جامد به مقدار بسیار زیادی گردد. ولی در پیل‌های سوختی دما پایین مانند پیل سوختی غشای پلیمری، همانگونه که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است، ریفورمینگ خارجی باید به کار برده شود و مونوکسید کربن تولیدی که سمی برای این پیل‌های سوختی می‌باشد، باید از جریان سوخت جدا گردد که این امر مستلزم هزینه‌های زیاد و استفاده از سیستم‌های پیچیده می‌باشد [۵ و ۷].



شکل ۵-۲: شماتیکی از ریفورمینگ خارجی مورد استفاده برای پیل سوختی غشای پلیمری [۵]

سوخت بسیار مورد توجه و دارای صرفه اقتصادی برای سیستم‌های پیل سوختی اکسید جامد با کاربردهای ساکن، گاز طبیعی می‌باشد که بخش قابل توجهی از این گاز، شامل متان و مقداری نیز شامل هیدروکربن‌های دیگر است. دلیل توجه به این سوخت این است که گاز طبیعی سوختی پاک و نسبتاً ارزان می‌باشد، می‌تواند به طور مستقیم به عنوان سوخت استفاده شود [۹-۱۰] و در بسیاری از مکان‌ها امکانات زیرساختی استفاده از این سوخت فراهم شده است. گاز طبیعی می‌تواند به طور مستقیم به همراه بخار آب یا اکسیژن وارد سیستم پیل سوختی اکسید جامد شده و ریفورمینگ گردد. حضور هیدروکربن‌های سنگین‌تر و سولفور به ترتیب باعث تشکیل لایه کربنی و مسمومیت سولفوری می‌شوند که باعث غیرفعال شدن و پایین آمدن ماندگاری و دوام سیستم پیل سوختی اکسید جامد می‌شوند. برای جلوگیری از چنین حالت‌هایی، جریان بیشتری از بخار آب یا اکسیژن، استفاده می‌گردد. از آنجا که پیل‌های سوختی اکسید جامد در دماهای بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد عمل می‌کنند و در این بازه دمایی، واکنش‌های الکتروکاتود نسبتاً سریع می‌باشند، می‌توان از حرارت آن برای تولید گرما و همچنین فراهم نمودن گرمای موردنیاز فرآیند ریفورمینگ سوخت داخلی که فرآیندی گرماگیر می‌باشد، استفاده نمود [۷]. شکل ۲-۶ جریان‌های گرمایی در یک سیستم استک پیل سوختی اکسید جامد را نشان می‌دهد که برای ریفورمر داخلی مورد استفاده قرار گرفته است و همچنین می‌تواند عامل محرکی برای توربین‌های گازی باشد [۵].



شکل ۲-۶: جریان گرمایی در ریفورمینگ داخلی پیل سوختی اکسید جامد که جذب گرما توسط ریفورمر داخلی انجام می‌گیرد

فشار عملیاتی در پیل سوختی اکسید جامد فشار معمولی می‌باشد. در فشار معمولی بازدهی پیل ۴۵٪ می‌باشد ولی اگر تحت فشار قرار گیرد بازدهی آن تا ۶۰٪ هم قابل افزایش است و در صورت سیکل ترکیبی می‌تواند تا ۸۰٪ برسد. از مهمترین مزایای پیل سوختی اکسید جامد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- سوخت‌های متنوعی در آن قابل استفاده هستند.

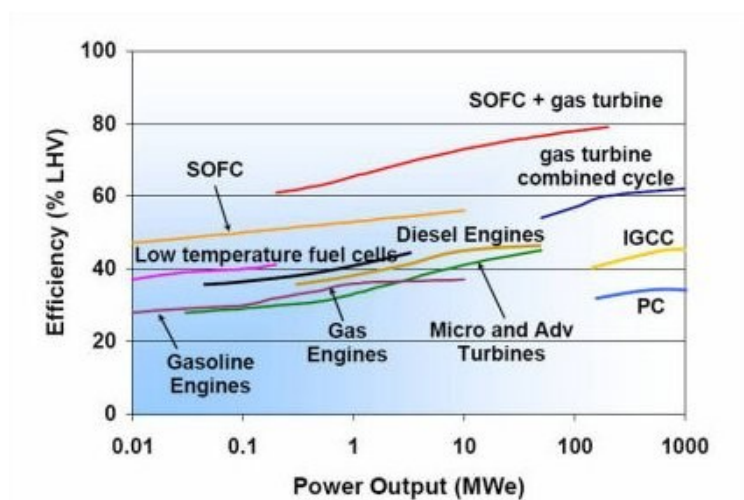
۲- تبدیل سوخت خام به هیدروژن، با استفاده از گرمای تولید شده، توسط پیل صورت می‌گیرد و نیازی به مبدل خارجی نیست.

۳- مونوکسید کربن و گوگرد مسموم کننده الکتروده‌های پیل سوختی اکسید جامد نیستند، حتی مونوکسید کربن به عنوان سوخت استفاده می‌شود.

۴- تمام اجزاء آن جامد هستند و قابلیت طراحی به اشکال مختلف را دارند و درجه حرارت بالای پیل باعث تخریب آنها نمی‌شود.

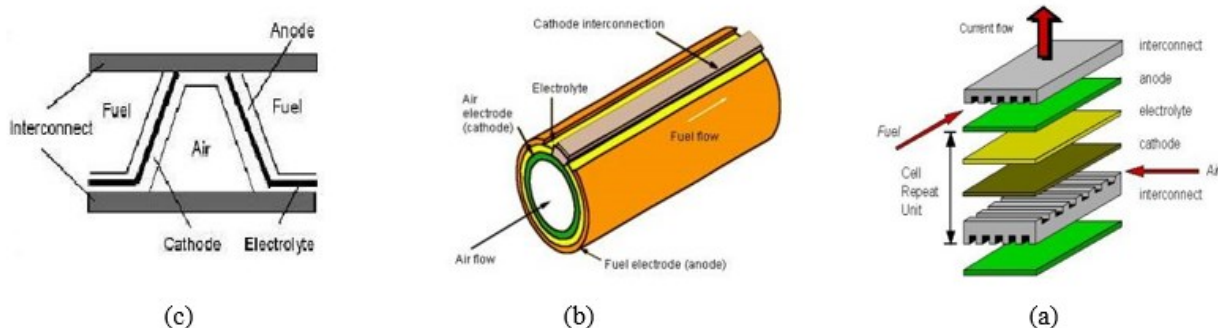
۵- نیازی به تزریق مجدد الکترولیت آن نمی‌باشد.

۶- بازدهی آن بالا می‌باشد و از گرما و بخار آب تولید شده از آن در سیکل ترکیبی می‌توان استفاده کرد که بدین ترتیب بازده سیستم افزایش می‌یابد (شکل ۷-۲، شکل ۷-۲).



شکل ۷-۲: بازده بالای پیل سوختی اکسید جامد نسبت به سایر منابع تولید توان

پیل سوختی اکسید جامد به سه شکل می‌تواند وجود داشته باشد که عبارتند از: لوله‌ای، مسطح و مونولیتیک. نوع مونولیتیک در مراحل اولیه توسعه می‌باشد و در اندازه‌های ۱ کیلوواتی ساخته شده است. انواع پیل سوختی اکسید جامد در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. جدول ۴-۲، مقایسه‌ای بین دو نوع متداول پیل سوختی اکسید جامد را نشان می‌دهد.

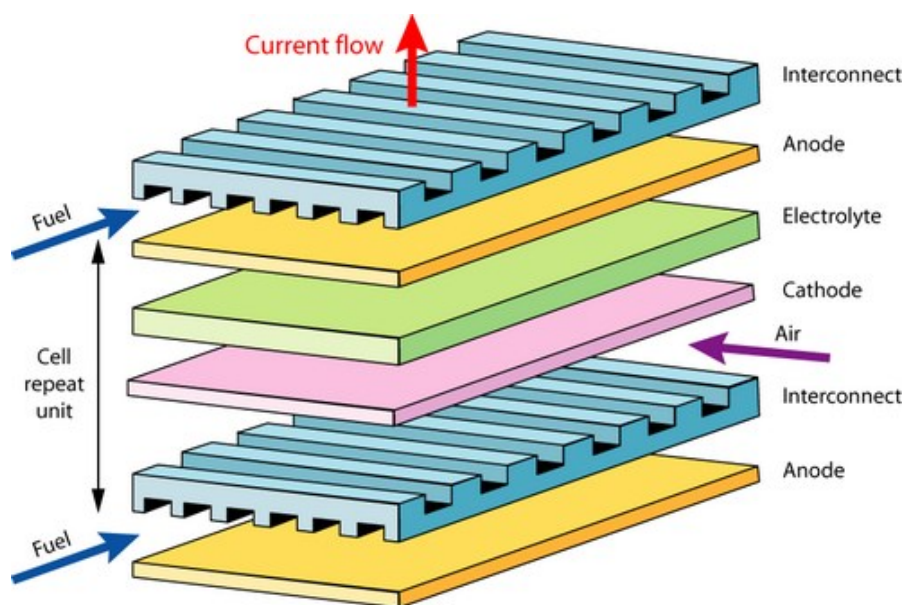


شکل ۸-۲: انواع پیل سوختی اکسید جامد. a: صفحه‌ای، b: لوله‌ای و c: مونولیتیک

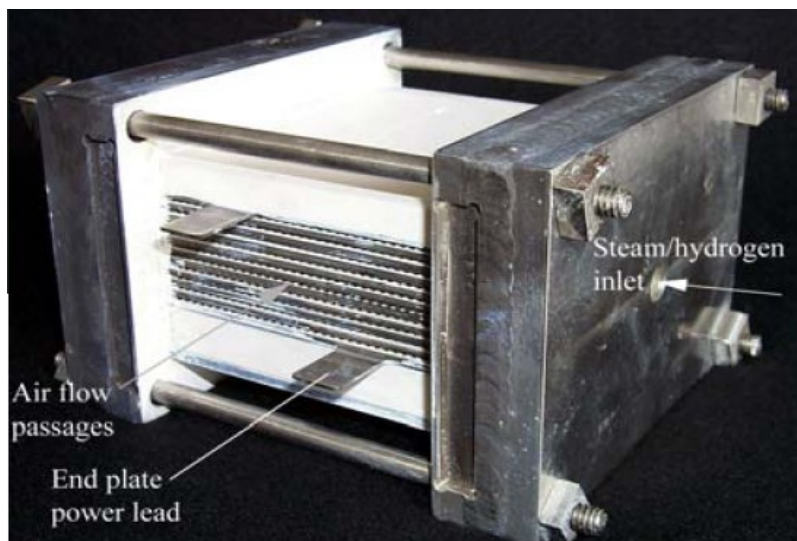
جدول ۲-۴: مقایسه‌ای بین دو نوع متداول پیل سوختی اکسید جامد

ویژگی	سل‌های لوله ای	سل‌های تخت
چگالی توان سطحی (W/cm^2)	کم (۰/۲-۰/۲۵)	زیاد (۰/۶-۲/۰)
چگالی توان حجمی (W/cm^3)	کم	زیاد
هزینه ساخت ($\$/kW$)	زیاد	کم
سیلانت‌های دما بالا	ضروری نیست	مورد نیاز است

پیل‌های سوختی اکسید جامد نوع صفحه‌ای به دلیل داشتن چگالی توان بالا بسیار مورد توجه هستند. در این نوع طراحی سل‌ها قابلیت اتصال به هم توسط یک کانال باریک رسانا را دارند تا در کل توان قابل ملاحظه‌ای بدست آید. این اتصال دارای مسیر کوتاهی می‌باشد. این نوع طراحی دارای مشکلاتی نیز از قبیل گرم شدن بیش از حد و آب‌بندی استک می‌باشد.



شکل ۲-۹: اجزاء تشکیل‌دهنده یک سلول صفحه‌ای



شکل ۲-۱۰: استک از نوع SOFC صفحه‌ای

خروج گرمای تولید شده باعث ایجاد انبساط نامتجانس در سل و استک می‌گردد که باید به نحوی از سیستم خارج شود. اگر درجه حرارت کارکرد سل بالای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد، باید به آرامی آن را به این درجه حرارت رساند تا شکست در آن رخ ندهد. محدوده واکنش شیمیایی این نوع طراحی نیز کم می‌باشد که می‌توان به کمک ایجاد لایه‌هایی بین الکترودها و الکترولیت این مشکل را تا حد زیادی برطرف کرد. دانسیته توان تولیدی این نوع طراحی در مقایسه با طراحی لوله‌ای بیشتر است. کمپانی‌های بزرگی چون، دلفی^۱، بتل^۲، سولزر^۳ و غیره، بر روی این نوع طراحی تحقیقات زیادی انجام داده‌اند.

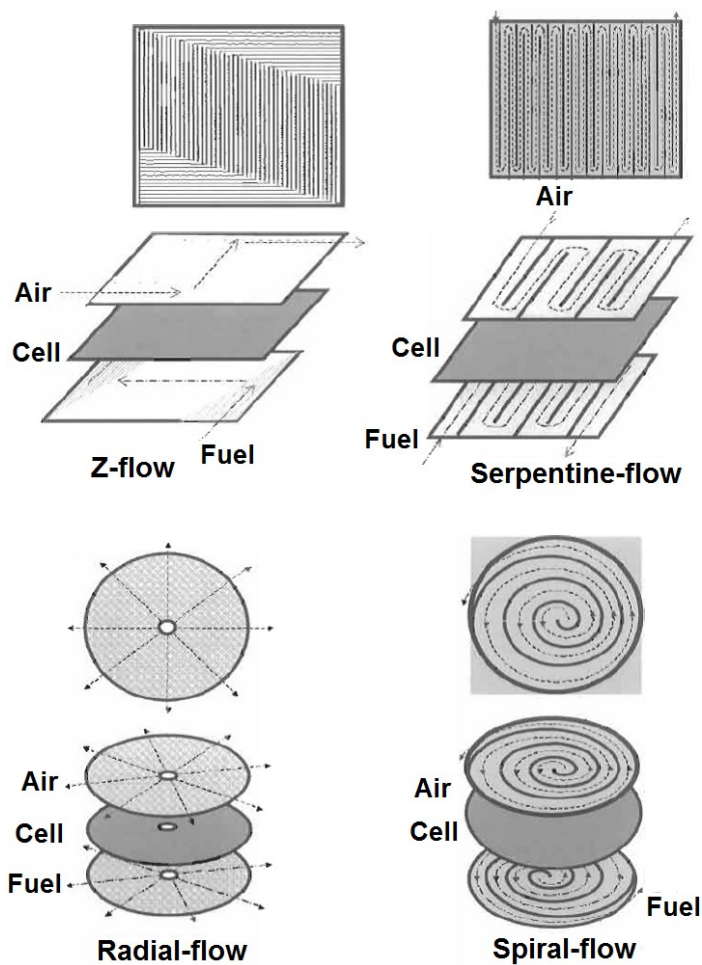
ساختار و توزیع جریان سوخت و هوا در پیل‌های سوختی اکسید جامد نوع صفحه‌ای، بسیار متنوع است. تعدادی از این ساختارها در شکل ۲-۱۱ مشاهده می‌شود. در بعضی از طراحی‌ها برای استک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای از ساختار ترکیبی استفاده می‌شود که به آن IP-SOFC^۴ اطلاق می‌گردد. این نوع پیل نیز بر اساس کاهش هزینه‌های ساخت و سازگاری حرارتی ساختار سل طراحی شده که هندسه و عملکرد آن به صورت نشان داده شده در شکل ۲-۱۲ است.

^۱ Delphi

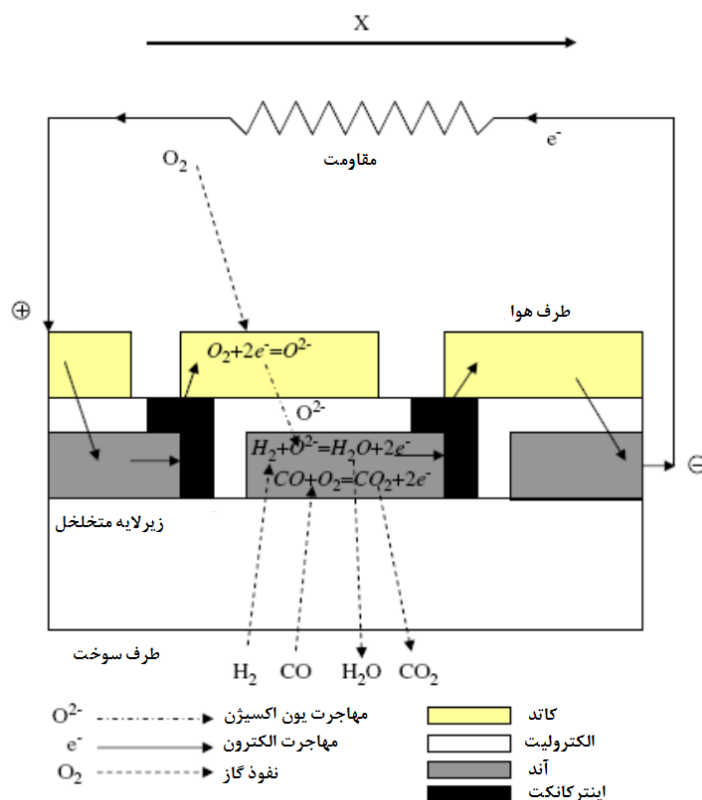
^۲ Battelle

^۳ Sulzer

^۴ Integrated planar



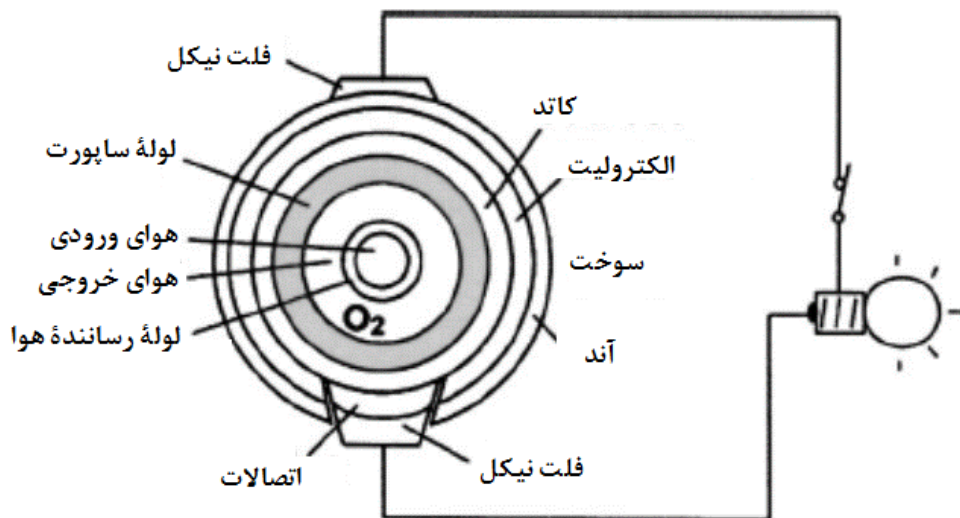
شکل ۲-۱۱: انواع ساختارهای جریان گاز برای پیل‌های سوختی نوع مسطح



شکل ۲-۱۲: شماتیکی از عملکرد یک پیل صفحه‌ای ترکیبی

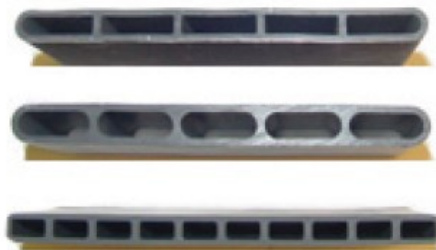
پیل‌های اکسید جامد لوله‌ای یکی از انواع مرسوم این نوع پیل‌ها می‌باشند که از لحاظ طراحی و امکان آب‌بندی بهتر، مورد توجه می‌باشند. در شکل زیر ساختار این نوع از پیل اکسید جامد نشان داده شده است. در این نوع طراحی مشکلات آب‌بندی و نشت گاز که در طراحی‌های دیگر وجود دارد برطرف شده است. همچنین واکنش‌های باز فراوری هیدروژن از سوخت هیدروکربنی یا سوخت‌های دیگر می‌تواند به طور داخلی در درون پیل انجام شود. در مقابل، مقاومت الکتریکی بیشتر این نوع پیل نسبت به انواع دیگر به دلیل مسیر نسبتاً طولانی عبور جریان، از معایب آن محسوب می‌شود.

در این نوع پیل مجموعه کاتد، الکترولیت و آند به صورت لوله‌ای شکل ساخته می‌شوند. جریان هوا از داخل لوله (معمولاً از جنس اکسید آلومینیوم) به سمت انتهای بسته پیل هدایت شده و از آنجا در برگشت، با کاتد در تماس بوده و اکسیژن موجود در آن به تدریج مصرف می‌شود. جریان سوخت نیز از روی لوله بیرونی عبور داده می‌شود. در سطح تماس کاتد متخلخل و الکترولیت، اکسیژن یونیزه شده و یون اکسیژن از طریق الکترولیت به سمت آند هدایت می‌شوند. در سطح تماس الکترولیت و آند که در آنجا مولکول‌های هیدروژن حضور دارند یون‌های اکسیژن و هیدروژن واکنش داده و الکترون آزاد می‌کنند. الکترون آزاد شده از این واکنش الکتروشیمیایی از یک مدار خارجی به سمت کاتد هدایت شده و بدین طریق توان الکتریکی ایجاد می‌شود.



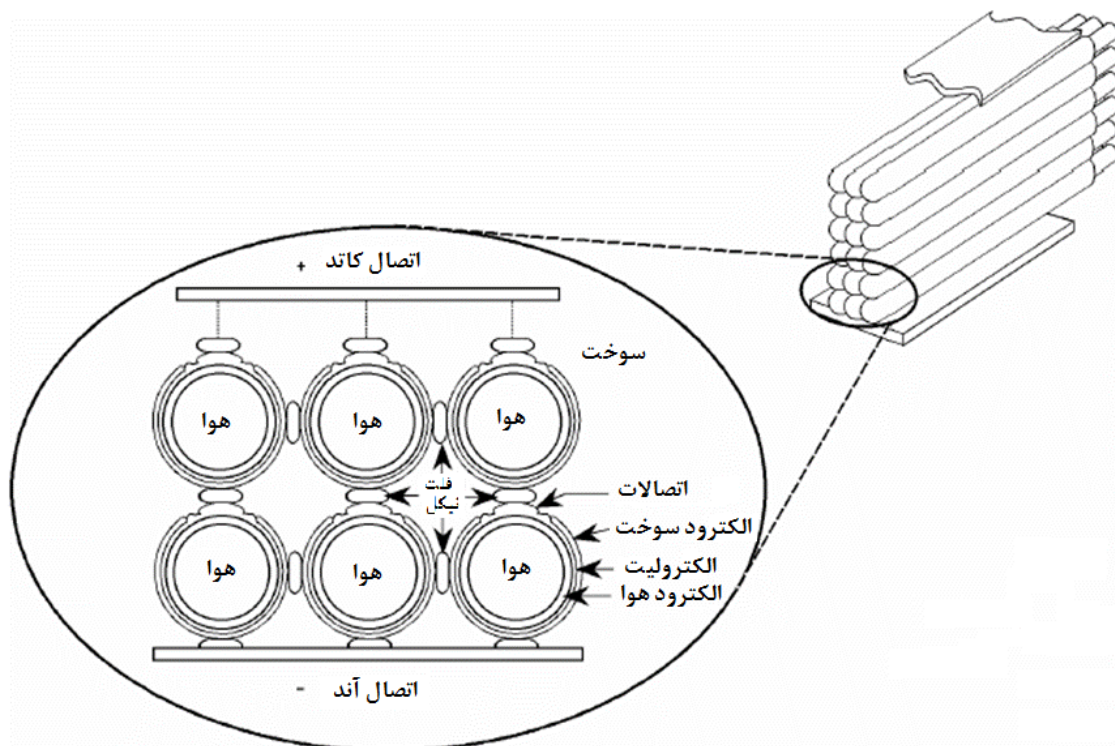
شکل ۲-۱۳: نحوه تولید توان الکتریکی در یک پیل اکسید جامد لوله‌ای

یکی از عیوب پیل‌های لوله‌ای نسبت به انواع دیگر، طولانی بودن مسیر عبور جریان (افت اهمی بالا) و دانسیته توان نسبتاً پایین آنها می‌باشد. برای رفع این مشکلات نوع دیگری از پیل‌های اکسید جامد لوله‌ای به صورت نشان داده شده در شکل زیر وجود دارند.



شکل ۲-۱۴: طراحی جدید پیل اکسید جامد لوله‌ای به صورت لوله‌های با مقطع بیضی‌شکل

طراحی لوله‌ای اولین بار توسط کمپانی زیمنس انجام شد. این کمپانی سل‌هایی لوله‌ای شکل به طول ۱/۵ تا ۲ متر تولید کرد. سل لوله‌ای بزرگتر، ساخت راحت‌تر و کاربری آسان‌تری داشتند. به دلیل فاصله بین لوله‌ها (سل‌ها) توان تولیدی در طراحی استک لوله‌ای نسبت به حالت صفحه‌ای کمتر است. با کاهش این فاصله و کاهش قطر لوله‌ها توان این نوع پیل افزایش می‌یابد. امروزه مدل‌های میکرولوله‌ای طراحی و ساخته شده که نتایج مناسبی را ارائه نموده‌اند.

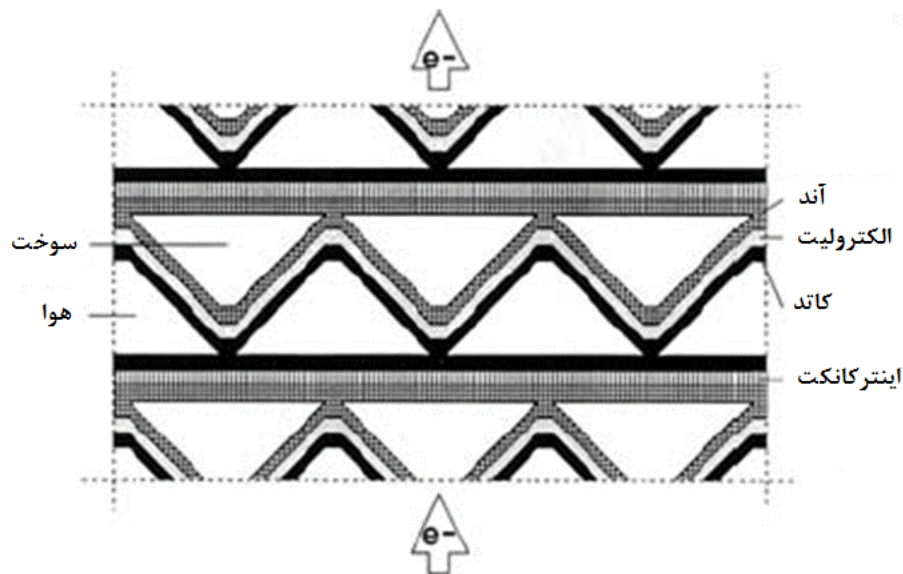


شکل ۲-۱۵: استک از نوع SOFC لوله‌ای [۴]

در طراحی لوله‌ای مشکل آب‌بندی به راحتی قابل حل می‌باشد. به این صورت که لوله منبع هوا (اکسیژن) به داخل لوله پیل متصل می‌شود و دیگر با سوخت و محصولات واکنش، تماس پیدا نمی‌کند. با وجود پیر هزیننه بودن ساخت پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای، برخی مزایا باعث شده که این نوع طراحی مورد توجه قرار گیرد، که می‌توان به دلایل زیر اشاره کرد:

- قابلیت کارکرد طولانی مدت سل بدون خرابی
- قابلیت استفاده از متان به عنوان سوخت
- امکان هدایت گاز خروجی به سمت توربین‌های گازی
- تشعشع کم

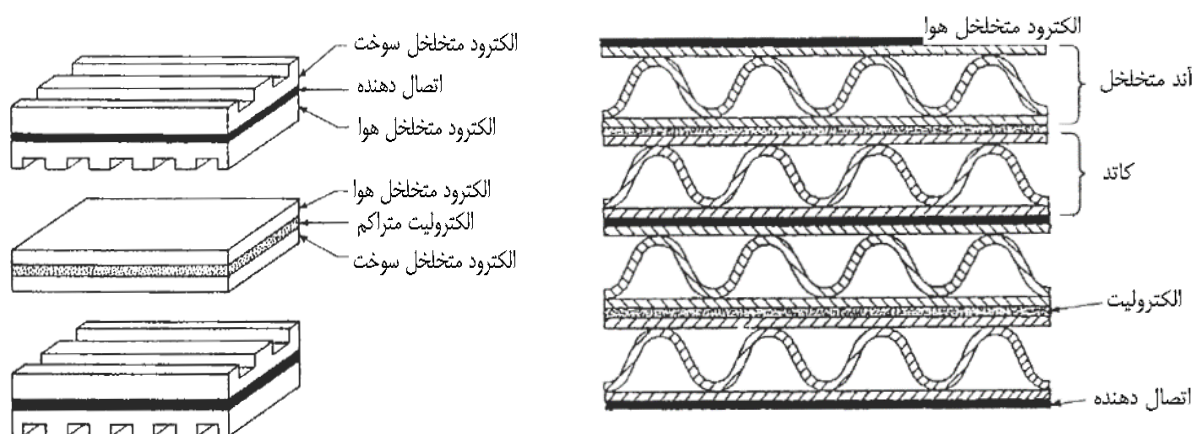
طراحی بعدی که مورد بحث قرار می‌گیرد، طراحی مونولیتیک می‌باشد. این نوع پیل سوختی اصولاً یک طراحی استک می‌باشد و نمی‌توان برای آن تک سل را در نظر گرفت.



شکل ۲-۱۶: استک از نوع SOFC مونولیتیک

این نوع طراحی دارای بیشترین توان خروجی در بین انواع پیل سوختی می‌باشد. مشکل ضریب انبساط حرارتی در این طراحی تا حدود زیادی حل شده است. از مشکلات این پیل می‌توان به فرآیند ساخت دشوار آن اشاره کرد. به هر حال این طراحی جدید می‌باشد و تحقیقات بر روی آن همچنان ادامه دارد.

در ساختار مونولیتیک، لایه‌های آند و کاتد را به صورت چین خورده تهیه می‌کنند. لایه اتصال دهنده در بین لایه‌ها به صورت صفحه‌ای قرار می‌گیرد. لایه‌ها از طریق برآمدگی‌های هر لایه به یکدیگر متصل می‌شوند تا ساختار استک را ایجاد کنند (ساختار مونولیتیک اصولاً یک ساختار استک است و تک سل در این طراحی مفهومی ندارد).



شکل ۲-۱۷: شماتیک پیل سوختی اکسید جامد مونولیتیک

مهم‌ترین مشکل در پیل سوختی اکسید جامد مونولیتیک هدایت حرارتی و پایین بودن شوک‌پذیری آن است. به همین دلیل این نوع پیل سوختی را نمی‌توان در ابعاد بیشتر از چند سانتی‌متر ساخت.

در ساخت این نوع پیل‌های سوختی ابتدا لایه‌ها را با روش‌هایی مانند ریخته‌گری نواری تهیه می‌کنند. سپس لایه‌ها را به هم متصل می‌کنند (لمینیت کردن)^۱. سپس توسط غلطک‌های مخصوص، ساختار چین‌دار را ایجاد می‌کنند و سپس به این ساختار چین‌دار لایه‌های دیگر را متصل می‌کنند. به همین ترتیب لایه‌های مختلف را ایجاد می‌کنند و تمامی لایه‌ها را با هم خشک و به طور همزمان زینتر^۲ می‌کنند. از مهمترین مشکلات در حین ساخت، زینترینگ این لایه‌ها به طور همزمان می‌باشد. با توجه به اینکه لایه‌ها با هم زینتر می‌شوند عدم انطباق ضرایب انبساط حرارتی لایه‌ها می‌تواند باعث جدایی لایه‌ها و یا ایجاد تنش در فصل مشترک لایه‌ها و اتصالات آنها گردد. از دیگر مشکلات در حین زینترینگ می‌توان به نفوذ عناصر لایه‌های مختلف به درون ساختار لایه‌های دیگر اشاره کرد. با توجه به دمای بالای زینترینگ، نفوذ رخ می‌دهد.

از مهمترین مزایای این نوع طراحی می‌توان به رفع مشکل عدم تطابق در ضرایب انبساط حرارتی بین اتصال دهنده‌ها و دیگر اجزاء پیل اشاره کرد. در این ساختار کانال‌های سوخت و هوا در ساختار آند و کاتد تعبیه شده است ولی در دیگر ساختارها مسیرهای عبور گازها در اتصال دهنده‌ها قرار داشت. لذا در این طراحی می‌توان لایه اتصال دهنده را کاملاً متراکم ساخت که به نوبه خود در افزایش راندمان سل موثر می‌باشد (می‌تواند تمامی جریان را انتقال دهد). زینترینگ اتصال دهنده‌ها در این حالت آسانتر صورت می‌گیرد و حتی می‌توان زینترینگ در حضور فاز مایع را داشت [۱].

یکی از انواع ساختارهای مونولیتیک طراحی مونولیتیک لانه زنبوری^۳ می‌باشد. در این ساختار که در شکل ۲-۱۸ نمایش داده شده است توسط اکستروژن لایه‌ای الکترولیت و اتصال دهنده ابتدا تهیه می‌گردد. سپس لایه‌های آند و کاتد به روش‌های مختلفی چون Sol-gel (پوشش‌دهی غوطه‌وری^۴)، EVD، CVD، ریخته‌گری دوغابی^۵ و غیره بر روی این ساختار اکستروژن شده پوشش داده می‌شوند. می‌توان درون حفره‌های لانه زنبوری را با الیاف آند و کاتد پر کرد (به جای اینکه آنها را بر روی الکترولیت پوشش داد) تا نواحی واکنش و یا جمع‌آوری جریان بهتر صورت بگیرد.

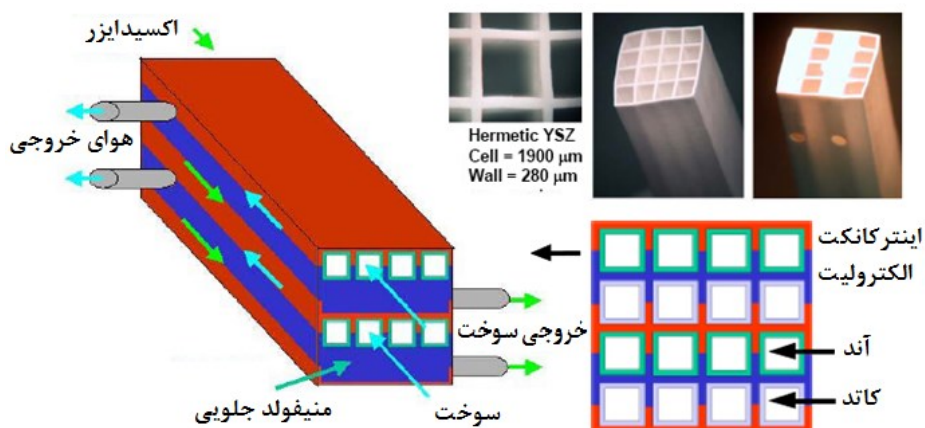
^۱ Lamination

^۲ Sintering

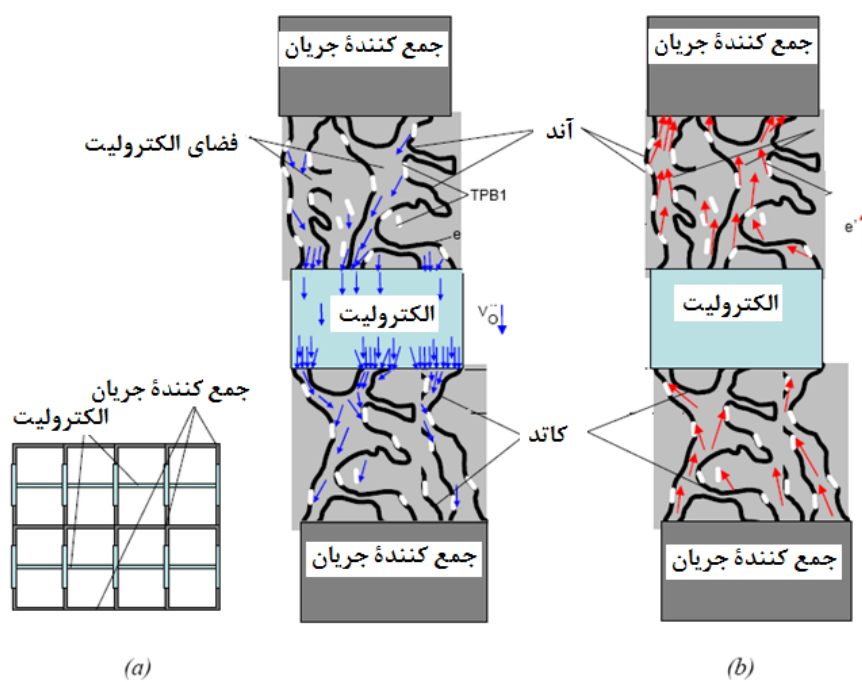
^۳ Honeycomb

^۴ Dip coating

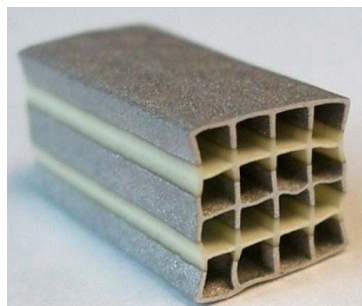
^۵ Slurry coating



شکل ۲-۱۸: شماتیک و تصویر یک SOFC مونولیتیک لانه زنبوری



شکل ۲-۱۹: شماتیک پیل سوختی پر شده با الیاف از جنس الکترودها

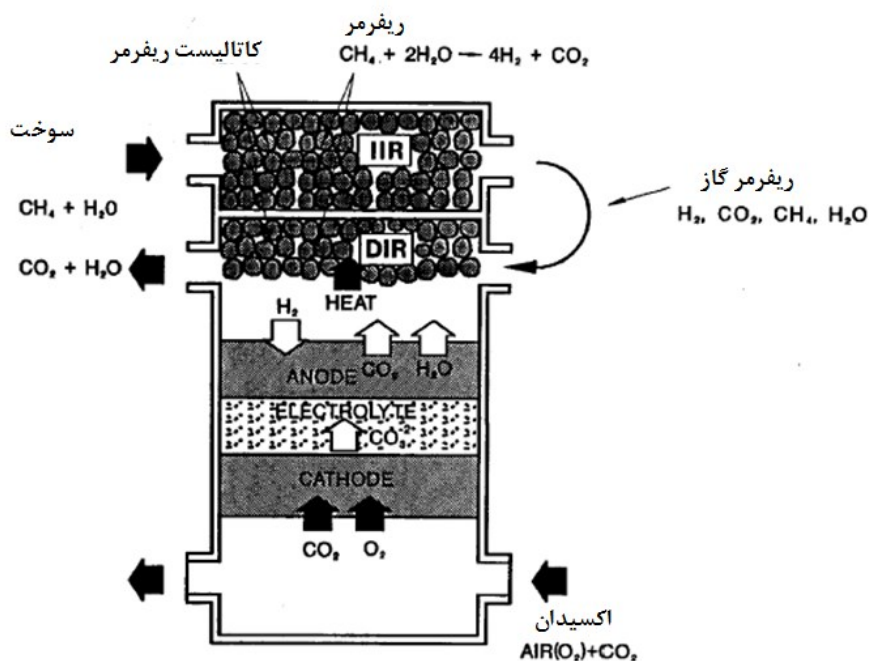


شکل ۲-۲۰: نمایی از یک ساختار مونولیتیک لانه زنبوری شامل دو بخش الکترولیت و اتصال دهنده (پس از زینترینگ)

آب‌بندی این نوع ساختار در مقایسه با طراحی صفحه‌ای راحت‌تر است و می‌توان با استفاده از آب‌بندهای شیشه سرامیکی، آب‌بندی را انجام داد.

۲-۱-۲- کاربرد پیل سوختی اکسید جامد

با توجه به مزایای پیل سوختی اکسید جامد کاربردهای متعددی برای آن وجود دارد ولی در حال حاضر از پیل‌های اکسید جامد برای نیروگاه‌های متوسط، بزرگ و سیکل‌های ترکیبی استفاده می‌شود. از آنجایی که پیل‌های سوختی اکسید جامد دارای دمای عملیاتی بالا (بالای ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) می‌باشند و می‌توانند نقش مبدل داخلی را داشته باشند، می‌توان در این نوع از پیل‌های سوختی از سوخت‌های فسیلی نظیر گاز طبیعی بطور مستقیم استفاده نمود. همین امر سبب گردیده تا پیل‌های سوختی اکسید جامد، مهمترین کاندید جهت استفاده در نیروگاه‌های غیرمتمرکز باشند. علاوه بر این، گرمای تولید شده در این نوع پیل‌های سوختی دارای کیفیت بالایی بوده و قابل استفاده در سیکل‌های ترکیبی و سیستم‌های تهویه مطبوع منازل می‌باشند. همین امر سبب می‌شود تا راندمان مجموعه این پیل سوختی و چگالی توان آن بالا باشد. نداشتن اثرات زیان‌بار زیست محیطی، از دیگر مزایای پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد.

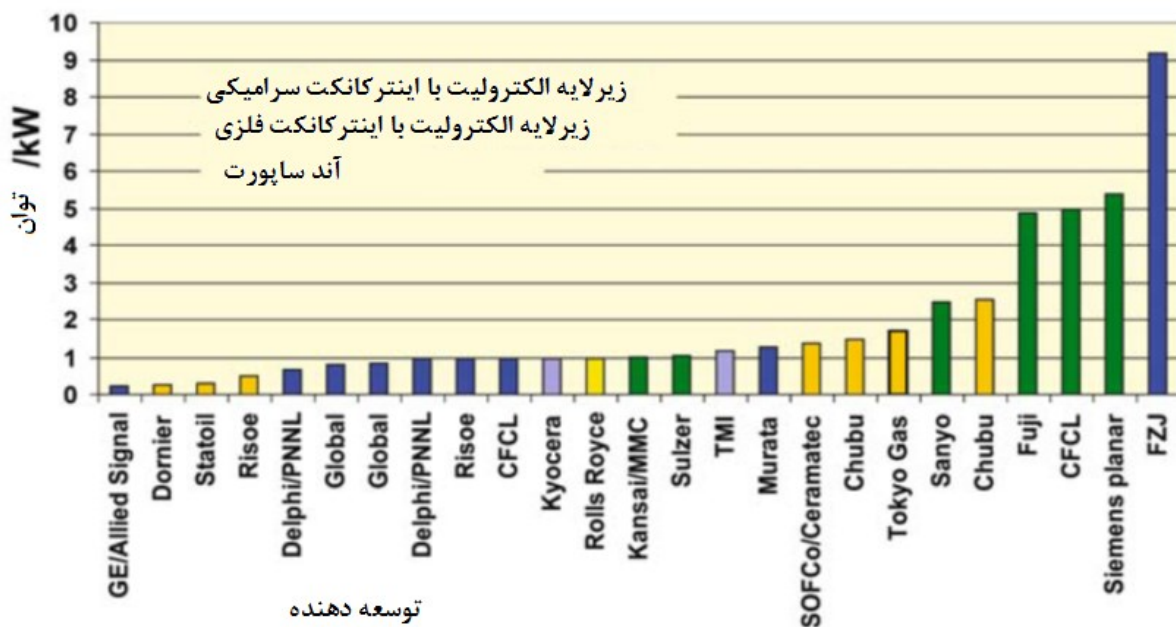


شکل ۲-۲: نحوه عملکرد پیل سوختی با مبدل داخلی

پیل‌های سوختی اکسید جامد کاندیدای مناسبی برای استفاده در خودروها می‌باشند. همچنین این پیل‌ها در برخی از تجهیزات نظامی نظیر هواپیماها بدون سرنشین و خودروهای نظامی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در میان انواع طراحی‌های

پیل سوختی اکسید جامد، بیشترین کارهای انجام شده مربوط به نوع لوله‌ای می‌باشد. با این حال، مقاومت الکتریکی نوع لوله‌ای SOFC بالا بوده و چگالی توان حجمی (W/cm^3) آن کم است. چگالی توان پایین نوع لوله‌ای سبب شده که تنها در کاربردهای ثابت مناسب باشند و قابلیت زیادی برای کاربردهای متحرک نداشته باشند. زیمنس-وستینگهاوس یک سیستم ۱۰۰ کیلوواتی با ۱۱۵۲ سل (قطر ۲/۲ سانتی‌متر و طول مفید ۱۵۰ سانتی‌متر) در ۱۲ ردیف ساخته است. این سیستم در هلند به مدت ۲ سال با گاز طبیعی و با بازده ۴۷ درصد کار کرد. این سیستم همچنین برای تولید تقریباً ۸۵ کیلووات آب داغ جهت استفاده سیستم گرمایش محلی به کار رفت. این سیستم‌ها قابلیت ترکیب با توربین گاز را دارند. سیستم ترکیبی توربین گاز-SOFC دارای بازده‌ای در حدود ۷۰ درصد می‌باشد. شرکت زیمنس-وستینگهاوس سیستم ترکیبی با توان تقریبی حدود ۲۵۰ کیلووات تولید نموده است. استک SOFC حدود ۲۰۰ کیلووات و توربین گاز حدود ۵۰ کیلووات برق تولید می‌کند.

نوع صفحه‌ای SOFC قابلیت رسیدن به چگالی‌های توان بالاتری را دارد. همچنین دارای هزینه ساخت پایین‌تری می‌باشد. این قابلیت‌ها سبب شده که این نوع از SOFC در اندازه‌های ۳ تا ۱۰ کیلوواتی برای کاربردهای ثابت، متحرک و نظامی ساخته و مورد استفاده قرار گیرند. شکل ۲-۲۲، توان استک‌های ساخته شده توسط شرکت‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۲: توان پیل‌های سوختی اکسید جامد صفحه‌ای ساخته شده توسط موسسات مختلف

اولین کاربرد پیل‌های سوختی صفحه‌ای مربوط به واحدهای توان یدکی آن‌بورد^۱ (APU) است که از سوخت موجود استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها به دلیل صرفه‌جویی در مصرف سوخت، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در سیستم‌های اتومبیل دلفی، یک APU با استفاده از پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای ۵ کیلووات برای تامین برق سیستم تهویه مطبوع توسعه داده شده است.

۲-۱-۳- توسعه پیل‌های سوختی اکسید جامد در دنیا

توسعه SOFC اولین بار توسط بار و پریس^۲ در سال ۱۹۳۷ انجام گرفت. آنها تحقیق خود را بر پایه کارهای انجام گرفته توسط نرنست (۱۸۸۹) بر روی ترکیبات جامد بنا نهادند. آنها ترکیبی شامل ۳۰ درصد زیرکات لیتیم و ۱۰ درصد خاک رس و ۶۰ درصد ماده نرنست ($85\% \text{ZrO}_2 - 15\% \text{Y}_2\text{O}_3$) را به عنوان الکترولیت ارائه دادند. از آنجا که این مواد بسیار گران قیمت بودند، عملاً به ساخت و کاربرد نرسیدند.

در ۱۹۶۲، روکا و ویسبارت^۳ در شرکت وستینگهاوس، پیل سوختی اکسید جامدی با الکترولیت $85\% \text{ZrO}_2$ و $15\% \text{CaO}$ ساختند. در این سیستم از پلاتین متخلخل به عنوان الکترود استفاده گردید. سل در یک لوله (آب‌بند شده از یک انتها) که از موادی مشابه الکترولیت ساخته شده بود، قرار می‌گرفت. سل ابتدا به وسیله هیدروژن و اکسیژن خالص و سپس به وسیله مخلوطی از $3/8$ درصد متان، $2/1$ درصد آب و $94/1$ درصد نیتروژن به عنوان سوخت در آند تست شد. تست‌ها در دمای بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت [۱].

وستینگهاوس توسعه سیستم‌های SOFC را در سال ۱۹۹۸ و با همکاری زیمنس دوباره آغاز نمود. کمپانی مشترک زیمنس - وستینگهاوس ایده SOFC صفحه‌ای را با همکاری چند مرکز تحقیقاتی در آلمان دنبال نمود. در بازار جدید SOFC، علاقه به استفاده از این تکنولوژی در زمینه‌های نظامی یکی از بخش‌های مهم توسعه است. علاوه بر این، چندین سازنده بزرگ اتومبیل بر روی استفاده از سیستم‌های SOFC برای تامین توان یدکی خودرو کار می‌کنند.

استفاده از سیستم‌های SOFC به ۳ گروه اصلی زیر تقسیم می‌شود:

الف) کاربردهای ساکن^۴

^۱ On-board auxiliary power units

^۲ Baur and Preis

^۳ Ruka and Weissbart

^۴ Stationary application

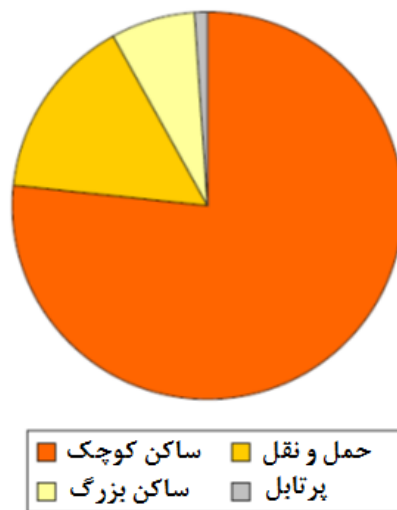
- کاربرد بزرگ: بزرگ‌تر از ۱۰ کیلووات

- کاربرد کوچک: کوچک‌تر از ۱۰ کیلووات

ب) کاربردهای حمل نقل متفرقه^۱

ج) کاربردهای پرتابل^۲

شکل زیر، سهم هر یک از موارد کاربرد SOFC را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۳: تعداد کلی واحدهای نصب شده پیل سوختی اکسید جامد بر حسب نوع کاربریشان [۸]

از شکل پرواضح است که اکثریت واحدهای SOFC نصب شده برای کاربردهای ساکن کوچک هستند. این گروه شامل واحدهای ساکن مورد استفاده برای تامین برق خانگی، کاربردهای صنعتی، UPS^۳ و کاربردهای نظامی هستند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، بازده بالا و دماهای عملکردی بالا، SOFC را برای این کاربردها بسیار مناسب نموده است. استفاده از SOFC در بخش حمل و نقل متفرقه بیش از کاربردهای ساکن بزرگ است. SOFC های ساخته شده در بخش حمل و نقل، می‌توانند به عنوان سیستم‌های مستقل در APU ها، برای تامین توان یدکی خودروها به کار روند. از نظر کار بر روی SOFC، قاره اروپا با حدود ۳۵ درصد بیشترین سهم را به خود اختصاص داده است. آمریکا شمالی مقام دوم را دارد. حدود ۱۹ درصد از کمپانی‌ها اعتقاد دارند که تجارتشان جهانی است و به کشور خاصی محدود نیست [۸].

^۱ Niche transportation application

^۲ Portable

^۳ Uninterrupted Power Supply

با توجه به روند رو به رشد و توسعه روزافزون پیل سوختی اکسید جامد، موسسات بسیاری در جهان بر روی آن کار می‌کنند. جدول‌های زیر موسسات توسعه دهنده پیل سوختی و زمینه فعالیت آنها را نشان می‌دهند.

جدول ۲-۵: موسسات توسعه دهنده پیل سوختی اکسید جامد در اروپا [۶]

کشور	انستیتو/شرکت	کارکنان	توسعه استک	تمرکز اصلی توسعه
سوئیس	Sulzer Hexis	بیش از ۶۰	اینترکانکت فلزی، پایه الکترولیت؛ پایه آند	مواد، سل، استک، ساخت، سیستم
هلند	ECN	۱۵	-	توسعه سل، ساخت
انگلستان	Ceres Power	۱۶	صفحه‌ای، الکترولیت CGO، اینترکانکت فلزی، پایه فلز	مواد، سل، استک، ساخت، سیستم
	Rolls Royce	۶۰	صفحه‌ای، روی پایه سرامیکی متخلخل	سیلانت، سل، استک، ساخت، سیستم
فرانسه	EDF/GDF	۱۰	-	تغییر سوخت، تست سل
	CEA	۲۵۰	-	مواد
آلمان	FZJ	۷۰	صفحه‌ای، اینترکانکت فلزی، پایه آندی	مواد، سل، استک، ساخت، سیستم، مدلسازی
	Siemens	۱۸	لوله‌ای، لوله تخت	مواد، ساخت
	DLR-Stuttgart	۱۰	صفحه‌ای، اینترکانکت فلزی، پایه فلزی	مواد، سل، استک، ساخت
	BMW	۹	صفحه‌ای، اینترکانکت فلزی، پایه فلزی	استک، ساخت، سیستم
	IKTS-Dresden	۶	صفحه‌ای، اینترکانکت فلزی، پایه الکترولیت	استک
	HC Strak/Indek	-	-	پودر/ساخت سل
	Haldor Topsoe	-	-	سیستم، ریفورمر
دانمارک	Risoe	بیش از ۷۰	صفحه‌ای تا سال ۱۹۹۹؛ اینترکانکت سرامیکی، پایه الکترولیت از سال ۲۰۰۰ اینترکانکت فلزی، پایه آندی	مواد، سل، استک

جدول ۶-۲: موسسات توسعه دهنده پیل سوختی اکسید جامد در آمریکای شمالی [۶]

کشور	انستیتو/شرکت	کارکنان SOFC	توسعه استک	تمرکز اصلی توسعه
کانادا	Global Thermoelectric (FCE)	۸۰	صفحه‌ای، پایه آندی؛ اینترکانکت فلزی	مواد، سل، استک، ساخت، سیستم
	SWPC با FCT	-	-	سیستم
امریکا	SWPC	بیش از ۱۲۰	لوله‌ای (پایه کاتدی)	مواد، سل، ساخت، سیستم
	Delphi	۶۵	صفحه‌ای، اینترکانکت فلزی، پایه آندی	سل، استک، سیستم، APU
	McDermott Technologies	۳۰	صفحه‌ای، اینترکانکت سرامیکی، پایه الکترولیتی	مواد، سل، استک، ساخت، ریفورمر
	GE	۱۵	صفحه‌ای، اینترکانکت فلزی، پایه آندی	مواد، سل، استک، ریفورمر
	PNNL	۶۰	صفحه‌ای، اینترکانکت فلزی، پایه آندی	مواد، سل، مدلسازی
	ANL	۵	صفحه‌ای، اینترکانکت فلزی، پایه الکترولیت	مواد، سل، مدلسازی
	LLNL	-	صفحه‌ای، پایه آندی	سل، استک
	Accumentrics	-	لوله‌ای (پایه آند)	سل، استک، سیستم
	ZTek	-	صفحه‌ای، اینترکانکت فلزی	سل، استک، سیستم

جدول ۷-۲: موسسات توسعه دهنده پیل سوختی اکسید جامد در آسیا [۶]

کشور	انستیتو/شرکت	کارکنان SOFC	توسعه استک	تمرکز اصلی توسعه
ژاپن	Chubu EPCO MHI (CEPCo)	باهم ۱۲۰ نفر	طراحی MOLB: صفحه ای، اینترکانکت سرامیکی، پایه الکترولیت	مواد، استک، سل، ساخت، سیستم
	MHI به همراه EPDC		لوله ای (پایه لوله متخلخل، اتصال سری)	مواد، سل، استک، ساخت، سیستم
	Mitsubishi Materials	-	الکترولیت گالات	مواد، سل، استک
	TOTO با Kyushu EPCo	-	لوله ای (پایه کاتدی)	مواد، سل، استک، ساخت
	Kyocera	-	صفحه ای استوانه ای	مواد، سل، استک، ساخت
	Tokyo Gas	-	صفحه ای، اینترکانکت فلزی، پایه آندی	سل، استک
کره	KIER	-	لوله تخت پایه آند	استک، سیستم
استرالیا	CFCL	بیش از ۱۰۰	پایه الکترولیت؛ از سال ۲۰۰۱ اینترکانکت سرامیکی	مواد، سل، استک، ساخت، سیستم

شرکت‌های آمریکایی تحت برنامه^۱ SECA، بر روی توسعه سیستم‌های پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به ظرفیت ۳ تا ۱۰ کیلووات که قابلیت ترکیبی تا ظرفیت MW را داشته باشند، با هزینه ۴۰۰ دلار به ازای هر کیلووات کار می‌کنند. جدول ۸-۲، اهداف برنامه فوق را نشان می‌دهد.

جدول ۸-۲: برنامه SECA برای توسعه پیل سوختی اکسید جامد [۲]

۲۰۱۱	۲۰۱۰	۲۰۰۹	۲۰۰۸	۲۰۰۷	۲۰۰۶	۲۰۰۵	۲۰۰۴	۲۰۰۳	۲۰۰۲	فاز و زمانبندی
فاز III			فاز II			فاز I				DOE SECA (NG, LP Fuels)
توسعه محصول			طراحی و توسعه			توسعه فناوری				
هزینه هدف \$۴۰۰/kW			هزینه هدف \$۶۰۰/kW			هزینه هدف \$۸۰۰/kW				

^۱ Solid State Conversion Alliance

Acumentrics -۱-۳-۱-۲

این کمپانی بر روی ساخت SOFC های لوله‌ای با کاربرد UPS و سیستم‌های CHP کار می‌کند. از جمله محصولات این شرکت می‌توان به ساخت سیستم‌های ۵ و ۱۰ کیلووات اشاره نمود. در شکل ۲-۲۴ مشخصات و شکل واحد ۵ کیلووات این شرکت آمده است.

ELECTRICAL OUTPUT:

SOFC Power Output: 5 kW / 5 kVA [10 kW / 10 kVA]

Output Voltage: 208/120 VAC three-phase four-wire

Overload (3 sec): 21 amps [42 amps]

Start-up Time: Warm-up 10 - 30 min before power available

Output breaker: Triple pole

FUEL INPUT:

Fuel Types: natural gas, methane (standard)

propane, ethanol, methanol, and hydrogen (optional)

Delivery pressure: 7-14 inches water column (0.25-0.50 psig)

Inlet Pipe Size: Standard 3/4-inch supply

CO-GENERATION: (CP-SOFC-10000 only)

Waste Heat Recovery: ~4,000Watts

PHYSICAL:

Size: 68" L x 36" W x 60" H [68" L x 36" W x 72" H]

Weight: < 1,200 lbs [< 1,500 lbs]

Enclosure: NEMA 3R, Forest Green, removable locking doors

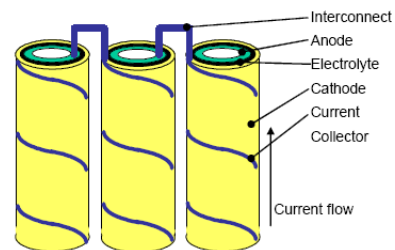
Mounting: Ground mounted, concrete or composite pad

ENVIRONMENTAL:

Operating Temperature: -20 through 120 degF

Altitude: 0-5000 ft (operating), 0-40,000 ft (non-operating)

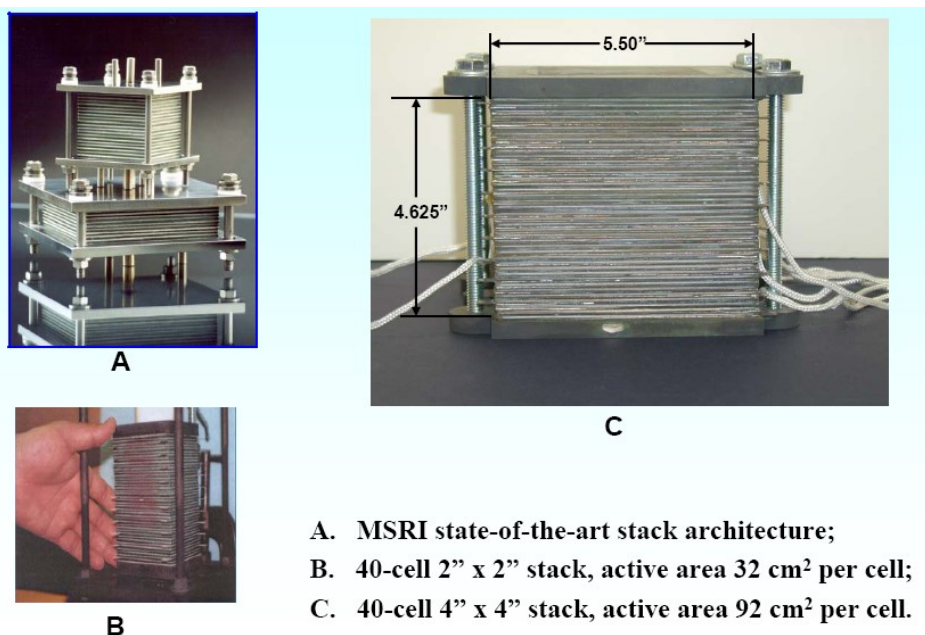
Acoustical Noise: 65 dBA at 3 ft



شکل ۲-۲۴: واحد ۵ کیلووات برای تامین برق ساخت شرکت Acumentrics

Materials and Systems Research Incorporated (MSRI) -۲-۳-۱-۲

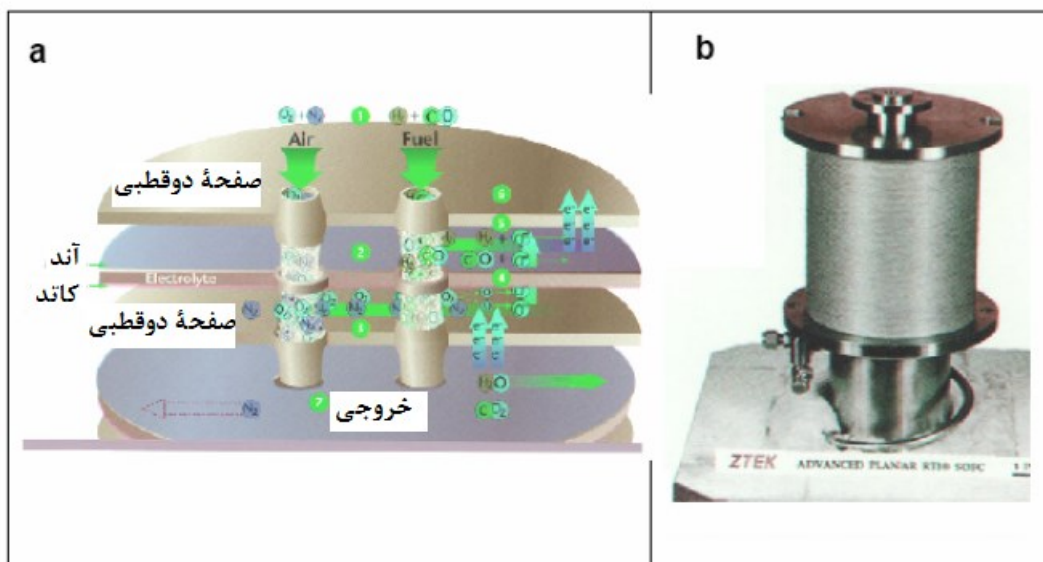
عمده فعالیت این شرکت بر روی SOFC های صفحه‌ای آند پایه برای دماهای کاری متوسط است. MSRI استک‌های ۱ تا ۳ کیلووات را با موفقیت ساخته است. این شرکت اخیراً یک سیستم ۳ کیلووات برای کاربرد در زیردریایی بدون سرنشین (UUV) به سفارش نیروی دریایی آمریکا ساخته است و در حال حاضر بر روی ساخت سیستم‌های ۱۰ تا ۱۰۰ کیلووات با سوخت‌های مختلف کار می‌کند.



شکل ۲-۲۵: استک‌های ساخته شده توسط شرکت MSRI [۳]

Ztec - ۳-۳-۱-۲

این شرکت در سال ۱۹۸۴ و با هدف پیشرفت و توسعه سیستم‌های پیل سوختی اکسید جامد تاسیس شد. شکل ۲-۲۶ استک SOFC ۱ کیلووات ساخت Ztec را نشان می‌دهد.

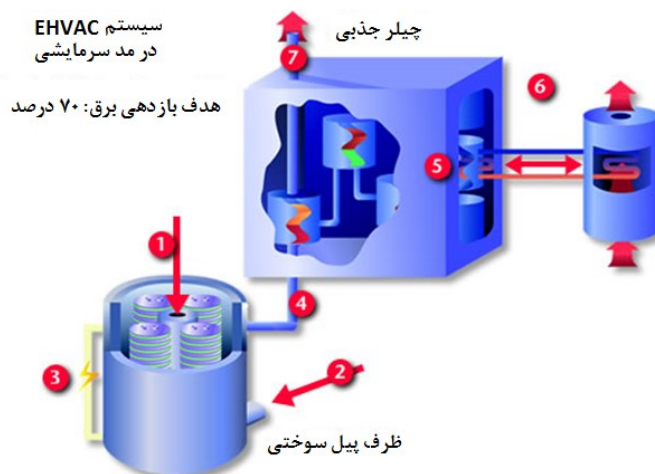


شکل ۲-۲۶: استک ۱ کیلووات ساخت شرکت Ztec.

Ztec کارهای گسترده‌ای را برای توسعه و ساخت سیستم‌های هیبرید SOFC انجام داده است. توسعه و ساخت یک سیستم ترکیبی ۲۵ کیلووات SOFC با چیلر جذبی، از جمله کارهای این شرکت است (شکل ۲-۲۷).

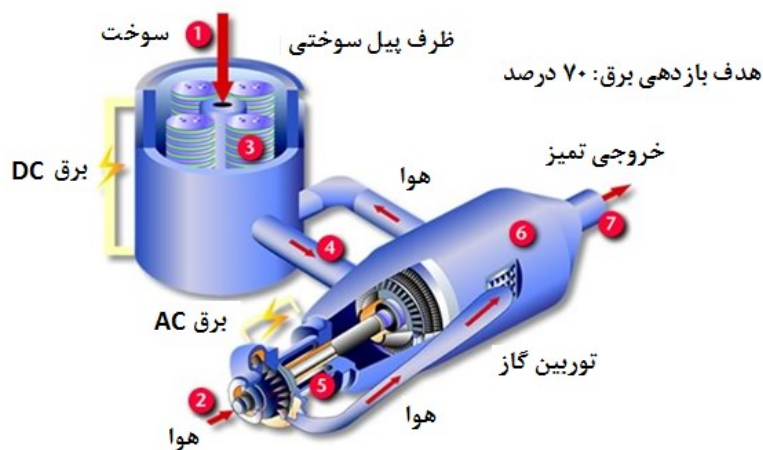


Testing of the 25kW power system.



شکل ۲-۲۷: سیستم ترکیبی SOFC با چیلر جذبی

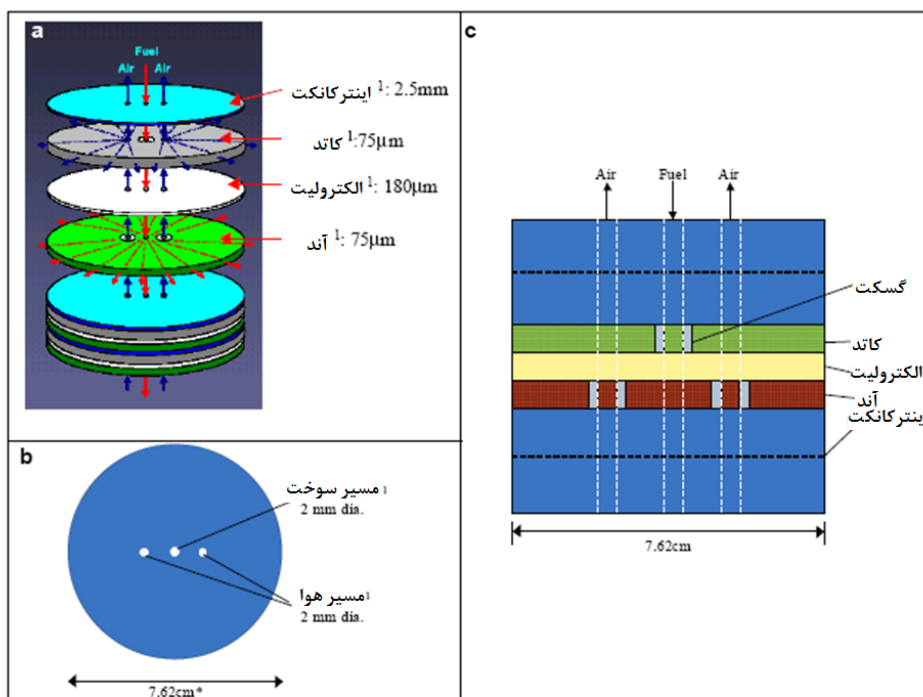
این شرکت اخیراً بر روی توسعه و ساخت یک سیستم هیبرید ۲۰۰ کیلووات SOFC با توربین گاز، کار می‌کند. شماتیک این سیستم در شکل ۲-۲۸ فراهم شده است.



شکل ۲-۲۸: شمای کلی سیستم هیبرید ۲۰۰ کیلووات SOFC با توربین گاز [۱۲]

۲-۱-۳-۴ Technology Management, Inc. (TMI)

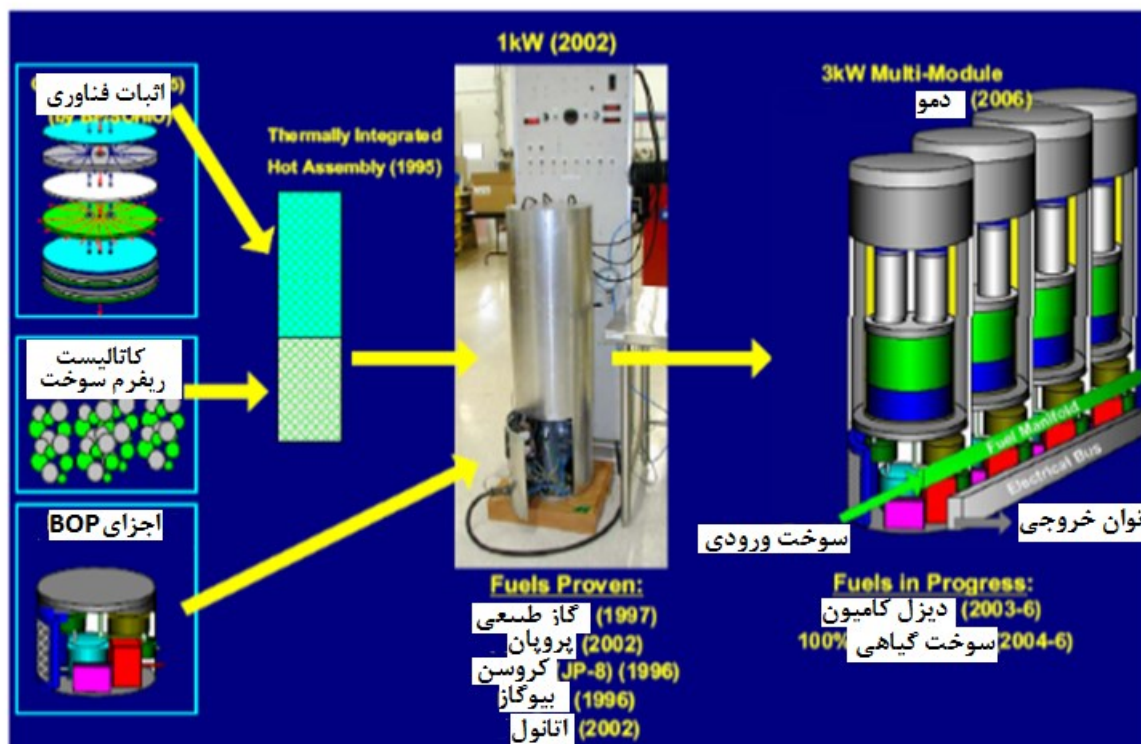
این شرکت از سال ۱۹۹۰ بر روی توسعه و ساخت سیستم‌های مختلف SOFC مشغول است. تمرکز اصلی TMI بر روی ساخت پیل‌های سوختی اکسید جامد صفحه‌ای دایره‌ای است.



پیش فرض^۱

شکل ۲-۲۹: پیل سوختی اکسید جامد ساخت شرکت TMI

این شرکت تاکنون موفق به ساخت و توسعه استک‌های ۱ و ۳ کیلوواتی که با سوخت‌هایی نظیر پروپان، گاز طبیعی، اتانول، بیوگاز، گازوئیل و روغن گیاهی کار می‌کنند، شده است.



TMI 1kW System (May, 2006)



شکل ۲-۳: استک‌های ساخته شده توسط شرکت TMI

این شرکت اخیراً بنا به سفارش ارتش آمریکا بر روی ساخت یک سیستم SOFC که با سوخت JP-8 کار می‌کند، متمرکز شده است.

Mesoscopic Devices - ۵-۳-۱-۲

این شرکت به ساخت سیستم تولید توان زیر ۱ کیلووات SOFC برای کاربردهای متحرک، مشغول است.

	وزن خشک: ۳ کیلوگرم وزن تر: ۵/۲ کیلوگرم سایز کنورتور: ۱۲۷×۱۷۸×۲۵۴ میلی‌متر حجم ۵/۲ لیتر انرژی ویژه سیستم: ۱۰۳۷Wh/kg سوخت: پروپان یا JP-8 بدون گوگرد چگالی ظرفیت: ۳۱۶۰ Wh/kg با ۲/۳ لیتر سوخت	وزن/سایز انرژی ویژه (سوخت در توان کامل برای ۷۲ ساعت)
پیک توان ۱۵۰ وات با هیبرید باتری زمان راه اندازی تا ۱۵ دقیقه تا ۵۰٪ توان		توان
ارتفاع تا ۳۰۵۰ متر	۲۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد شیب تا ۴۵ درجه نسبت به افق	شرایط کاری

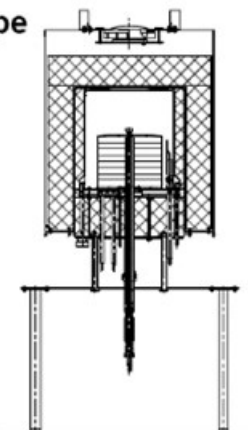
شکل ۳۱-۲: نمونه ۷۵ وات ساخته شده برای تولید برق توسط شرکت Mesoscopic Devices.

SOFCo (Mcdermott) - ۶-۳-۱-۲

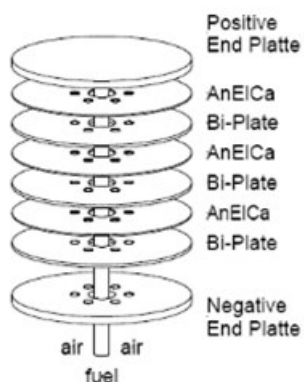
SOFCo با مشارکت Ceramtec و McDermott Technology از سال ۱۹۸۶ بر روی توسعه پیل‌های سوختی اکسید

جامد کار می‌کند. ساخت یک استک ۲ کیلووات با سوخت گاز طبیعی از جمله کارهای این شرکت است.

1 kW SOFC Prototype



طراحی سل و استک

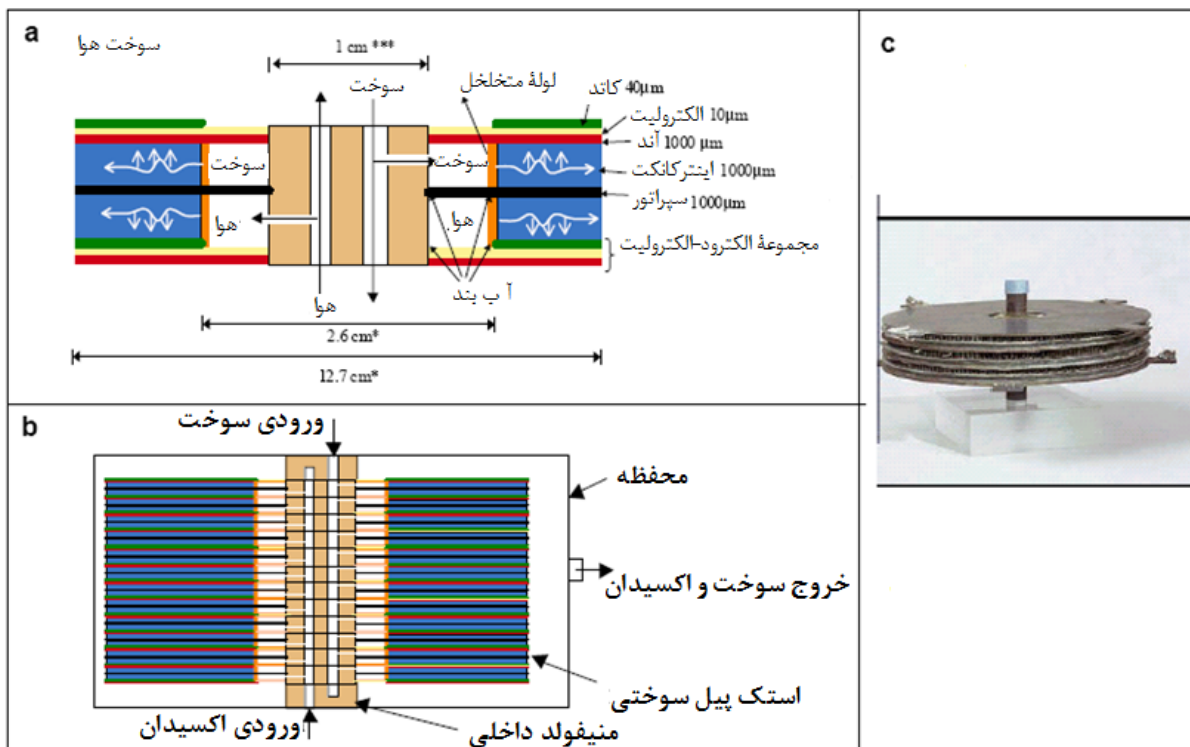


شکل ۲-۳: استک یک کیلوواتی ساخت SOFCo

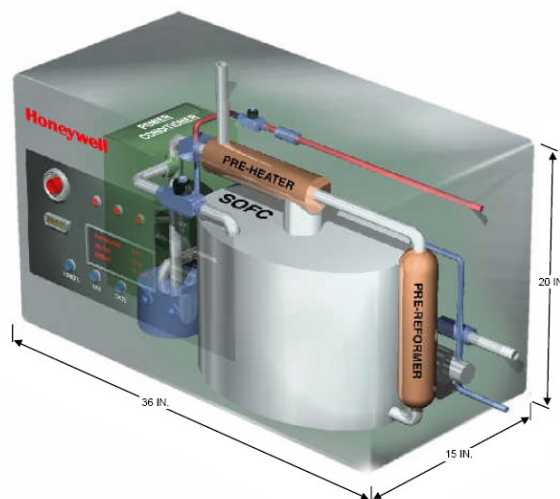
SOFCo در حال کار بر روی ساخت و توسعه واحدهای ۱۰ تا ۵۰ کیلووات است.

۲-۳-۱-۲ Honeywell (GE)

شرکت Honeywell با همکاری GE از سال ۲۰۰۲ به صورت جدی کار بر روی ساخت سیستم‌های پیل سوختی اکسید جامد را شروع کرد. عمده فعالیت آنها در ساخت استک‌های با ظرفیت ۳ تا ۱۰ کیلووات و ریفورمرهای سوخت متمرکز شده است. همچنین این شرکت بر روی پیل‌های سوختی اکسید جامد از نوع صفحه‌ای کار می‌کند.



شکل ۲-۳۳: نمای کلی سل و استک‌های ساخته شده توسط Honeywell



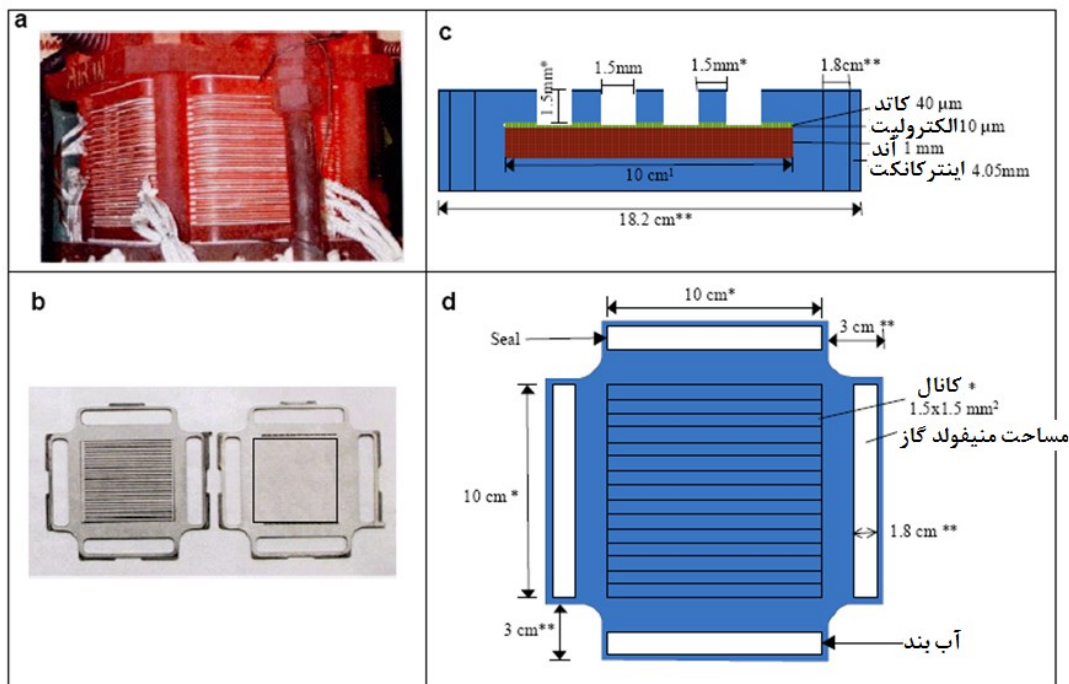
شکل ۲-۳۴: شماتیک سیستم ۵ کیلووات ساخت شرکت Honeywell

۲-۱-۳-۸- Delphi

این شرکت توسعه SOFC با هدف کاربرد متحرک آن را دنبال می‌کند. Delphi در سال ۲۰۰۰ کار خود را بر روی ساخت APU پنج کیلوواتی برای وسایل نقلیه شروع نمود. نسل اول این APU، ۲۰۴ کیلوگرم وزن و ۱۵۵ لیتر حجم داشت. در نسل‌های بعدی آن، وزن و حجم به طور قابل توجهی کاهش یافت.

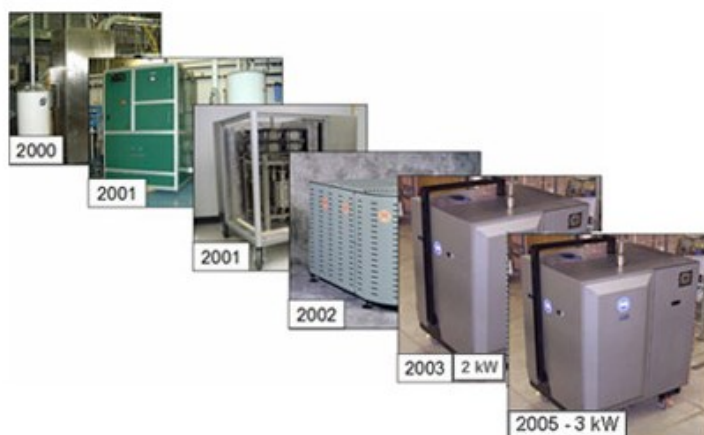
۹-۳-۱-۲- Global thermoelectric کمپانی

شرکت Global thermoelectric، یکی از شرکت‌های پیشرو در توسعه SOFC است. این شرکت در سال ۲۰۰۰ موفق به ساخت استک SOFC صفحه‌ای به ظرفیت ۱ کیلووات شد.



شکل ۲-۳۵: طراحی انجام شده توسط Global thermoelectric برای استک SOFC صفحه‌ای [۱۳]

این شرکت با پیوستن به شرکت Versa Power System کار خود را بر روی توسعه SOFC ادامه داد. شکل ۲-۳۶ مراحل توسعه استک را در این شرکت نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۶: مراحل توسعه استک در شرکت Versa Power System

۲-۱-۳-۱۰- توسعه SOFC در اروپا

موسسات بسیاری در اروپا بر روی توسعه پیل‌های سوختی اکسید جامد کار می‌کنند. جدول ۲-۹ فهرستی از این موسسات را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۹: موسسات توسعه دهنده SOFC در اروپا [۶]

کشور	انستیتو/شرکت	مفهوم	محور اصلی توسعه
دانمارک	Risoe با Haldor Topsoe	صفحه‌ای: تا ۱۹۹۹: اینترکانکت سرامیکی، پایه فلزی از ۲۰۰۰: اینترکانکت فلزی، پایه آندی	سیستم، ریفورمر، مواد، سل‌ها، استک
فنلاند	VTT	-	تغییر شرایط سوخت؛ تست سل و استک؛ مدلسازی
	Wartsila	-	سیستم
آلمان	BMW	صفحه‌ای؛ اینترکانکت فلزی؛ پایه فلزی	سیستم، استک
	DLR Stuttgart	صفحه‌ای؛ اینترکانکت فلزی؛ پایه فلزی	مواد، سل، استک
	FZJ	صفحه‌ای؛ اینترکانکت فلزی؛ پایه آندی	مواد، سل، استک، مدل‌سازی
	HC Starck/inDEC (NL)	-	پودر، ساخت سل
	IKTS Dresden	صفحه‌ای؛ اینترکانکت فلزی؛ پایه الکترولیت	استک
	Siemens	صفحه‌ای؛ اینترکانکت فلزی؛ پایه الکترولیت	مواد و ساخت
	Webasto	لوله‌ای، لوله تخت	استک، سیستم
	EFD/GDF	صفحه‌ای؛ اینترکانکت فلزی؛ پایه الکترولیت	تغییر سوخت، تست
فرانسه	CEA/Fuel cell Network	-	مواد
انگلستان	Ceres Power	-	مواد، سل، استک، سیستم
	Rolls Royce	صفحه‌ای، الکترولیت CGO برای ۵۵۰°C، اینترکانکت فلزی، پایه فلزی	مواد، سل، استک، سیستم
هلند	ECN	صفحه‌ای روی پایه سرامیک متخلخل	مواد، سل، استک
سوئیس	Hexis	صفحه‌ای؛ اینترکانکت فلزی؛ پایه الکترولیت و آندی	مواد، سل، استک، سیستم
اروپا-تعداد استخدام: ۴۵۰-۵۰۰ نفر			

۲-۱-۳-۱۱- FZJ، SOFC

FZJ، تحقیق بر روی پیل‌های سوختی اکسید جامد را از سال ۱۹۹۰ با کار در زمینه الکترولیت نازک آغاز نمود. این شرکت در زمینه‌ها و کاربردهای مختلفی از SOFC فعالیت نموده است. FZJ در ساخت و توسعه وسایل کاربردی SOFC متحرک و ساکن با دیگر موسسات همکاری تنگاتنگی دارد. همچنین انتقال دانش به موسسات Global Thermoelectric (Versa) و CeramTec از جمله کارهای این موسسه است. شکل ۲-۳۷ تعدادی از استک‌های ساخته و نصب شده توسط FZJ در نقاط مختلف جهان را نشان می‌دهد.

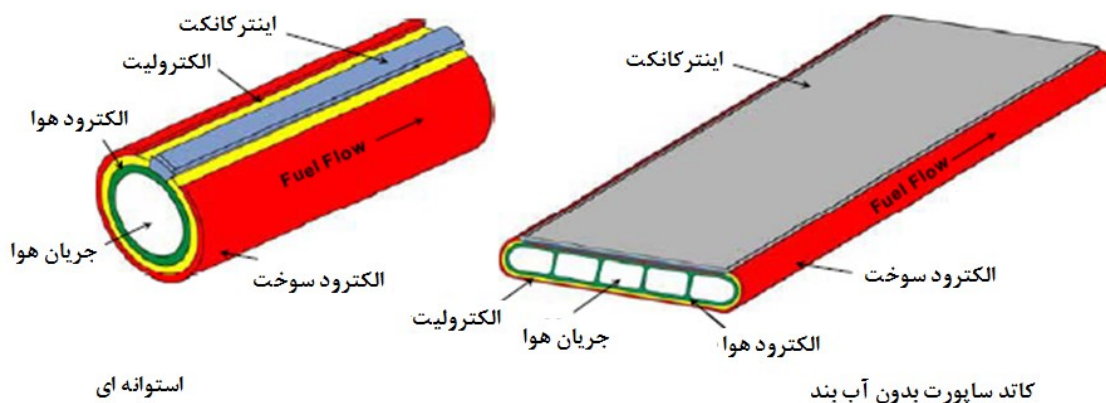
Canada feb 1998	Global 2x10x10x5 B-design	Italy 2005	Eurocoating 10x10x4 F-design
UK 2000/ 01	Alstom 2x10x10x5 C-design	RealSOFC VTT, CEA, EBZ, DLR..	10x10x2
Korea KIER 2004/ 05 E, F design	10x10x5 20x20x40 20x20x5 20x20x40	+ cooperation BMW, DRL	
Finland VTT 2004/ 05	20x20x10 20x20x50		



شکل ۲-۳۷: استک‌های ساخته و نصب شده توسط FZJ در نقاط مختلف جهان [۲]

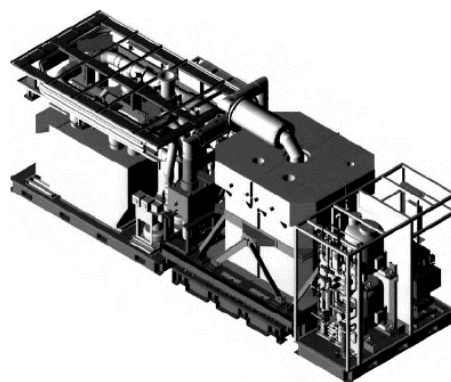
۱-۲-۳-۱۲- Siemens-Westinghouse

یکی دیگر از مهمترین شرکت‌های توسعه پیل سوختی جهان در آلمان فعالیت می‌کند. بیشترین کارهای این موسسه مربوط به نوع لوله‌ای SOFC می‌باشد. با توجه به چگالی توان پایین نوع لوله‌ای، این شرکت پیل سوختی اکسید جامد اصلاح شده تحت عنوان HPD را توسعه داد (شکل ۲-۳۸).



شکل ۲-۳۸: نوع HPD و لوله‌ای ساخته شده توسط Siemens-Westinghouse

زیمنس-وستینگهاوس یک سیستم ۱۰۰ کیلوواتی با ۱۱۵۲ سل (قطر ۲/۲ سانتی‌متر و طول مفید ۱۵ سانتی‌متر) در ۱۲ ردیف ساخته است. این سیستم در هلند به مدت ۲ سال با گاز طبیعی و با بازده ۴۷ درصد کار کرد. این سیستم همچنین برای تولید تقریباً ۸۵ کیلووات آب داغ جهت استفاده سیستم گرمایش محلی به کار رفت. این سیستم‌ها قابلیت ترکیب با توربین گاز را دارند. سیستم ترکیبی توربین گاز-SOFC دارای بازده‌ای در حدود ۷۰ درصد می‌باشد. شرکت زیمنس-وستینگهاوس سیستم ترکیبی با توان تقریبی حدود ۲۵۰ کیلووات تولید نموده است (شکل ۲-۴۰). استک SOFC حدود ۲۰۰ کیلووات و توربین گاز حدود ۵۰ کیلووات برق تولید می‌کنند [۵].



Part of a 100-kW SOFC combined heat and power unit. The fuel cell stack is the central unit. The fuel processing system is on the small skid at the front, and the thermal management/electrical/control system is at the rear. The unit is about 8.5 x 3 x 3 m. (Diagram reproduced by kind permission of Siemens Westinghouse Power Corporation.)

شکل ۲-۳۹: سیستم ترکیبی ۱۰۰ کیلووات SOFC

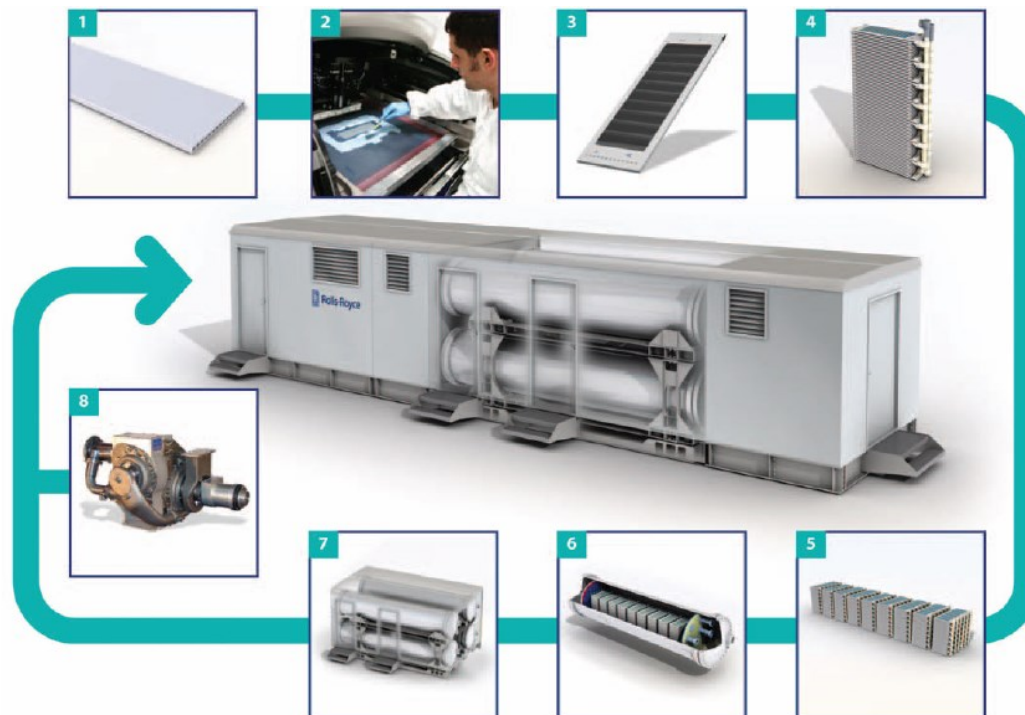


شکل ۲-۴۰: واحد ترکیبی ۲۵۰ کیلوواتی [۲۳]

این موسسه، عمده فعالیت خود را بر روی تجاری کردن واحدهای تولید توان SOFC کرده است.

Rolls Royce - ۱۳-۳-۱-۲

Rolls Royce به توسعه استک‌های نوع صفحه‌ای مشغول است. این موسسه در سال ۲۰۰۵ استک تحت فشار ۱۳/۶ کیلووات را ساخت. همچنین در سال ۲۰۰۶ واحد ۸۰ کیلوواتی با فشار ۷ بار را تولید نمود. هم‌اکنون مشغول کار بر روی سیستم ترکیبی ۱ مگاواتی است (شکل ۴۱-۲).



1. A flat ceramic tube enters the prototype, automated production line where it goes through various checks prior to printing.
2. The tube goes through various steps including multiple screen printing cycles, where the cells are printed onto the tubes, this is followed by drying and sintering, where a powder coalesces into a solid.
3. The result is a printed ceramic flat-tube with numerous fuel cells on each side of the tube.
4. Using Rolls-Royce system integration expertise, these tubes are first combined into bundles, then into strips and ultimately into fuel cell stacks with enough electricity to power multiple homes.
5. These stacks combined with a few unique, specially designed system components to form a stack assembly.
6. The stack assembly is placed inside a pressure vessel to form a generator module.
7. Four generator modules combine on a skid with fuel processing, turbomachinery and power electronics to form a one megawatt power plant.
8. The turbomachinery creates heat and pressure for the system.

شکل ۴۱-۲: شکل کلی سیستم ترکیبی یک مگاواتی SOFC شرکت Rolls Royce [۲۴]

Sulzer-Hexis - ۱۴-۳-۱-۲

شرکت Sulzer-Hexis، یکی دیگر از شرکت‌های فعال و پیشرو در توسعه پیل‌های سوختی اکسید جامد نوع صفحه‌ای است. این شرکت در سال ۱۹۹۹ استک ۱ کیلووات ساخت خود را با موفقیت تست نمود. شکل ۴۲-۲ طراحی سل انجام شده توسط این شرکت را نشان می‌دهد. واحدهای تولید توان/گرما این شرکت تحت عنوان Galileo، ۱ کیلووات برق و ۲/۵ کیلووات توان گرما ایجاد می‌کنند (شکل ۴۲-۲).

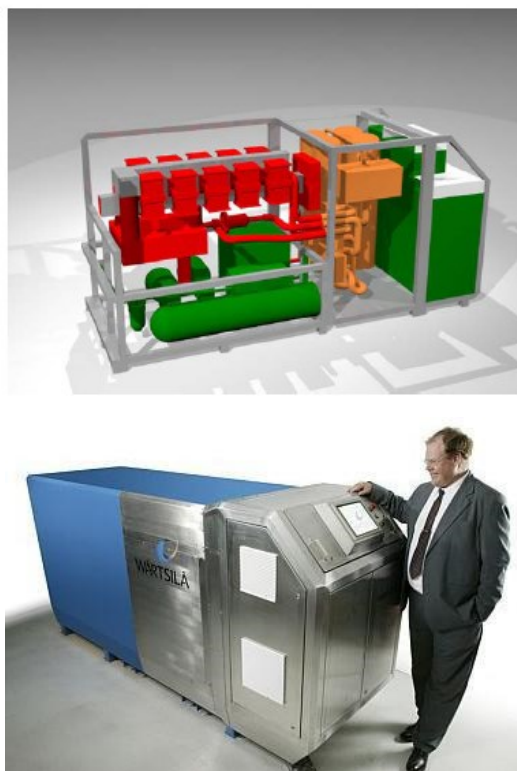
«Galileo 1000 N» – technical specifications	
■ Design specifications	
Electrical power of fuel cell:	1 kW max.
Thermal power of fuel cell:	2.5 kW max.
Thermal power of back-up burner:	20 kW max.
Electrical efficiency:	25-30% (goal: > 30%)
Overall efficiency:	> 90%
Type of fuel cell:	Hexis SOFC
■ Connection data	
Fuel:	Natural gas, mains pressure
Electrical connection:	230V AC, 50 Hz
■ Dimensions/Weight	
Width x Depth x Height:	55 x 55 x 160 cm
Space required:	3.0 m ²
Overall installed weight:	170 kg
Minimum room height:	2 m



شکل ۲-۴۲: مشخصات مدل 1000 N سیستم Galileo

۲-۱-۳-۱۵-Wartsila

فنلاند در سال ۲۰۰۰، تحقیق و توسعه بر روی سیستم‌های SOFC تجاری برای تولید برق و APU را آغاز نمود. این شرکت تست استک‌های ۱ تا ۵ کیلووات را به اتمام رسانده است. این موسسه با همکاری شرکت VTT، یک واحد ۲۰ کیلوواتی را توسعه دادند (شکل ۲-۴۳).



شکل ۲-۴۳: نمای کلی و مشخصات واحد ۲۰ کیلوواتی ساخت Wartsila [۲۶]

۲-۱-۳-۱۶- Tokyo Gas و J-Power ژاپن

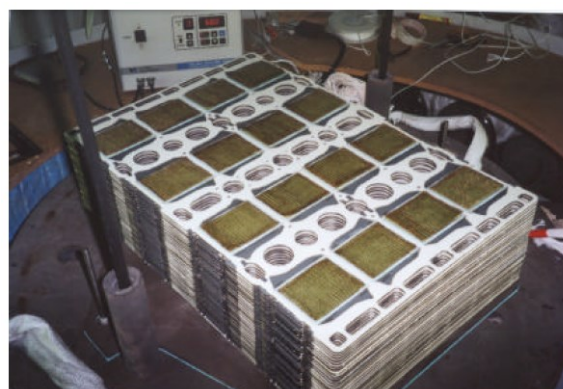
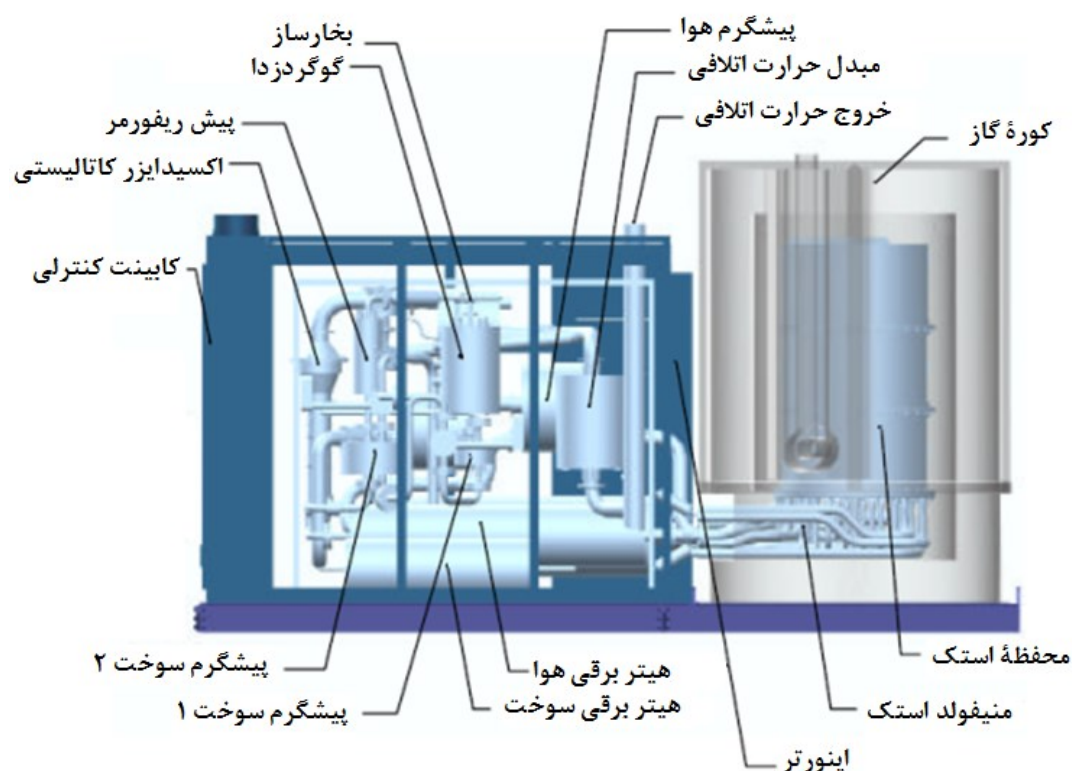
از سال ۱۹۸۹ با همکاری شرکت Mitsubishi Heavy Industries (MHI) با تحقیق بر روی ساخت SOFC نوع صفحه‌ای کار خود را شروع کردند. شرکت Tokyo Gas ساخت استک ۳ کیلوواتی صفحه‌ای را با موفقیت انجام داده است. شرکت Mitsubishi Heavy Industries دو نوع طراحی لوله‌ای و MOLB را برای پیل‌های سوختی خود در نظر گرفت. شرکت Mitsubishi Heavy Industries در سال ۲۰۰۶ یک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد با میکرو توربین به ظرفیت ۴۰ کیلووات را با موفقیت تست نمود. این شرکت در حال کار بر روی ساخت سیستم سیکل ترکیبی ۲۰۰ کیلووات SOFC با میکروتوربین و سیستم تولید همزمان برق/گرما ۱۵۰ کیلوواتی اتمسفریک است.



شکل ۲-۴۴: سیستم یک کیلووات CHP پیل سوختی اکسید جامد ساخت کمپانی Nippon-Shokubai Co., Ltd. [۲۷]

۲-۱-۳-۱۷- Ceramics fuel cells limited

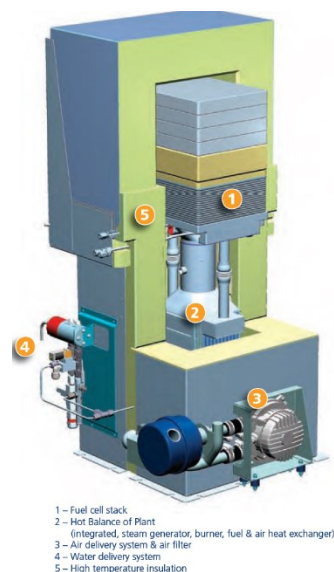
یکی دیگر از موسسات فعال در زمینه پیل سوختی اکسید جامد، شرکت Ceramics fuel cells limited (CFCL) است. CFCL از سال ۱۹۹۲ در زمینه پیل سوختی اکسید جامد فعالیت می‌کند. عمده فعالیت این شرکت در زمینه ساخت پیل‌های سوختی اکسید جامد صفحه‌ای (هم الکترولیت پایه و هم آند پایه) است. CFCL در سال ۱۹۹۸، استک ۵ کیلووات و در سال ۲۰۰۰، استک ۲۵ کیلووات پیل سوختی اکسید جامد را با موفقیت تست نمود. شکل ۲-۴۵، سیستم ۲۵ کیلووات ساخت CFCL را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴۵: سیستم ۲۵ کیلووات ساخت CFCL

شرکت CFCL یک سیستم یک کیلووات SOFC را برای تامین برق/گرما به نام Gennex توسعه داده است که در شکل ۲-۴۶ فراهم شده است. این سیستم برای کاربردهای میکرو CHP مناسب بوده و قابلیت کار با بویلرها و پمپ‌های حرارتی را دارا می‌باشد.

Performance	
Electrical output	1 kW
Thermal output	~250W – exhaust stream cooled to 60°C ~650W – exhaust stream cooled to 20°C
Electrical efficiency	Greater than 50%
System efficiency	60 to 85% depending on exhaust temp.
Emissions	
From fuel cell	CO (<10ppm) & H ₂ O (vapour)
	Virtually no NO _x or SO _x emissions
Exhaust flow	90 to 130 standard litres per min
Exhaust Temp.	155 °C (Dew point 54°C)
Connections	
Grid connection	Parallel 220 - 240 VAC
(Integrated by customer)	50Hz single phase
Natural gas	Supply pressure 0.9kPa to 3.0kPa (Gas desulphurisation integrated by appliance manufacturer)
Water	Supply Pressure 400kPa (Water treatment integrated by appliance manufacturer)
Operating Conditions	
Size: L x W x H	400 x 420 x 900 mm (excl ancillary equipment & high temperature insulation)
Ambient temp.	+2 °C to +40 °C
Inlet Air temp.	-20 °C to +40 °C
Location	Indoors
Start-up time	13 hours
Mass	55kg + (excl ancillary equipment & high temperature insulation)
Integration	
Waste heat recovery	By appliance manufacturer
Gas desulphurisation	By appliance manufacturer
Water treatment	By appliance manufacturer
Flue	By appliance manufacturer



شکل ۲-۴۶: سیستم ۱ کیلووات Gennex ساخت CFCL [۲۸]

۲-۲- پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)

۲-۲-۱- تاریخچه

استفاده از اسید به عنوان الکترولیت از سال ۱۸۴۲ توسط گرو آغاز شد. او از اسید سولفوریک استفاده کرد، اما اسید فسفریک یک رسانای ضعیف الکتریسیته است و مناسب نمی‌باشد. بنابراین PAFC ها نسبت به سایر انواع پیل سوختی با سرعت کمتری توسعه یافتند. در سال ۱۹۶۱، المر و تانر در مقاله‌ای تحت عنوان "پیل‌های سوختی با دمای متوسط"، نتایج تازه‌ای را منتشر ساختند. آنها تشریح کردند که در آزمایشاتشان از الکترولیتی استفاده کردند که ۳۵ درصد اسید فسفریک و ۶۵ درصد پودر سیلیکای چسبیده شده به یک واشر تفلونی دارد. آنها اذعان نمودند که بر خلاف اسید سولفوریک، اسید فسفریک تحت شرایط کاری، پایداری خود را به لحاظ الکتروشیمی از دست نمی‌دهد.

مهمترین فعالیت‌ها در زمینه تولید پیل سوختی اسید فسفریک در اواخر دهه ۱۹۶۰ تحت نام پروژه TARGET توسط گروهی متشکل از متخصصین صنایع برق و گاز آغاز شد. هدف اصلی این برنامه، گسترش نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت، جهت مصارف خانگی و کوچک بود. پیل سوختی اسید فسفریک به دلیل عدم حساسیت به CO_2 در این زمینه مورد استفاده قرار گرفت. پیل‌های سوختی اسید فسفریک اولین بار در سال ۱۹۶۰ برای استفاده در شاتل فضایی مورد استفاده قرار گرفتند. پیل‌های سوختی اسید فسفریک اولین پیل‌های سوختی هستند که به طور تجاری در دسترس قرار گرفتند. بر طبق آمار وزارت انرژی آمریکا بیش از ۲۷۰ نوع پیل سوختی اسید فسفریک در کاربردهای ساکن در دنیا گسترش یافتند. تعداد ۶۵ مولد پیل سوختی اسید فسفریک با سوخت گاز طبیعی توسط شرکت‌های سازنده موتور هواپیما Pratt & Whitney و با همکاری شرکت گاز آمریکا در فاصله سال‌های ۱۹۶۹ تا ۱۹۸۳ در آمریکا، کانادا و ژاپن، نصب و راه‌اندازی گردیدند. مجموع توان این واحدها از ۱۵ کیلووات در سال ۱۹۶۹ به ۵ مگاوات در سال ۱۹۸۳ رسید. همچنین آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس مطالعات پیل سوختی را با هدف ساخت خودروی گلف برقی مبتنی بر فناوری پیل سوختی اسید فسفریک آغاز کرد.

افزایش تحقیقات به منظور پاسخ دادن به نیازهای تجاری در زمینه تولید پیل‌های سوختی بوده و فعالیت‌های زیر در جهت پیشرفت پیل سوختی اسید فسفریک به منظور دستیابی به بازارهای تجاری انجام شده است:

۱- تولید، نصب و راه‌اندازی ۴۸ واحد نیروگاه ۴۰ کیلووات پیل سوختی اسید فسفریک به منظور تولید همزمان برق و حرارت از سال ۱۹۷۶. این پروژه با حمایت GRI و DOE انجام شد.

۲- نصب نیروگاه‌های ۱ مگاوات و ۴/۵ مگاوات جهت تولید انرژی الکتریکی توسط شرکت UTC. این شرکت ۲۴۵ واحد PC25 با توان ۲۰۰ کیلووات را بعد از سال ۱۹۹۰ به فروش رسانده است.

۳- فعالیت‌های تحقیقاتی توسط شرکت‌های Westinghouse و Engelhard در زمینه توسعه نیروگاه‌های پیل سوختی اسید فسفریک با سیستم خنک‌سازی هوا یا روغن.

بحران انرژی در سال ۱۹۷۳ باعث افزایش فعالیت‌ها در زمینه احداث نیروگاه‌های پیل سوختی اسید فسفریک گردید. این پیشرفت‌ها نه تنها در ایالات متحده بلکه در ژاپن هم مشاهده شد. در ژاپن برنامه Moonlight با پشتیبانی دولت ژاپن، به توسعه فن‌آوری‌هایی با مصرف بهینه انرژی متمرکز گردید. این برنامه‌ها شامل ساخت و نصب دو نیروگاه یک مگاوات از پیل سوختی اسید فسفریک می‌باشد [۱۳].

سیر تحول استک‌های پیل سوختی اسید فسفریک به شرح زیر می‌باشد:

در سال ۱۹۶۸ سیستم ۴ KW پیل سوختی اسید فسفریک مورد بهره‌برداری قرار گرفت. بین سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۷۳ این سیستم به ۱۲ KW ارتقا پیدا کرد و در سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۶ واحدهای تولید توان ۴۰ KW ساخته و مورد بهره‌برداری قرار گرفتند. سیستم‌های ۲۰۰ کیلوواتی بین سال‌های ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۲ وارد بازار مصرف شدند و از آن پس تا

کنون این سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مجموعاً تا سال ۱۹۷۶، ۱ مگاوات ظرفیت و تا سال ۱۹۹۱ حدود ۱۱ مگاوات ظرفیت تولید توان در دنیا نصب شده است.

۲-۲-۲- پیل سوختی اسید فسفریک

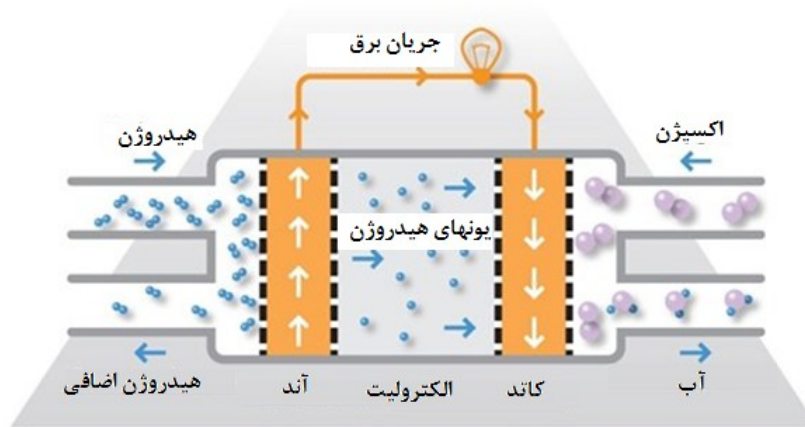
الکترولیت در این نوع پیل سوختی اسید فسفریک می‌باشد. در آند، هیدروژن به پروتون و الکترون تبدیل می‌شود. پروتون تولیدی در آند از طریق الکترولیت به کاتد رفته و الکترون نیز توسط یک مدار خارجی به کاتد می‌رسد. در کاتد نیز اکسیژن با پروتون و الکترون واکنش داده و به آب تبدیل می‌شود.

دمای عملیاتی در پیل سوختی اسید فسفریک بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده و هدایت الکترولیتی مطلوب در ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. از اینرو حرارت با کیفیت تولید خواهد کرد که می‌تواند برای تامین گرمای مورد نیاز جهت تولید هیدروژن و یا تهویه مطبوع سیستم مورد استفاده قرار گیرد. وجود گاز مونواکسید کربن به عنوان ناخالصی در هیدروژن مصرفی از ۱ تا ۲ درصد قابل تحمل بوده و باعث بروز مشکل در عملکرد پیل نمی‌شود.

مشکل عمده پیل سوختی اسید فسفریک پایین بودن سرعت احیا اکسیژن در کاتد می‌باشد که این مشکل با افزایش دمای عملیاتی پیل به بالاتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قابل حل می‌باشد. از دیگر مشکلات پیل سوختی کارکرد مداوم آن می‌باشد که موجب از کار افتادن پیل و جامد شدن اسید و از بین رفتن کل مجموعه می‌گردد. همچنین مایع بودن اسید سبب می‌گردد استفاده از این پیل سوختی تنها به کاربردهای ساکن محدود گردد.

پیل سوختی اسید فسفریک در دمای حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کند و از الکترولیت اسید فسفریک استفاده می‌کند و الکترودهای پیل‌های سوختی اسید فسفریک از جنس پلاتین می‌باشند که بر روی سطح پودر کربن فعال قرار دارند. در این نوع پیل سوختی از سوخت‌های بیشتری می‌توان استفاده کرد. عملکرد پیل سوختی اسید فسفریک به این ترتیب است که یون‌های هیدروژن مثبت از میان الکترولیت به سمت کاتد می‌روند تا با اکسیژن و الکترون‌ها ترکیب شده، آب و حرارت را تولید کنند و الکترون‌های به وجود آمده در آند از یک مدار خارجی عبور کرده و برق تولید می‌کنند و به کاتد بر می‌گردند. در کاتد الکترون‌ها، یون‌های هیدروژن و اکسیژن، آب تولید می‌کنند که با فشار به بیرون پیل سوختی هدایت می‌شود. وجود کاتالیست پلاتین موجب افزایش سرعت واکنش‌ها می‌شود. از مزایای پیل سوختی اسید فسفریک قابلیت تحمل میزان کمی از مونوکسید کربن و همین‌طور دماهای بالاتر از دمای جوش آب می‌باشد. این پیل سوختی باید اجزایی با مقاومت بالا داشته باشد تا در مقابل خوردگی اسید مقاومت کنند. هیدروژن مورد نیاز برای PAFC می‌تواند از یک ریفورمر خارجی با یک سوخت هیدروکربنی به وجود آید. در صورتی که سوخت مورد نظر گازوئیل باشد،

سولفور آن باید جدا شود، زیرا سولفور به کاتالیست الکترودها صدمه می‌زند. از گرمای بوجود آمده در PAFC ها می‌توان در کاربرد ترکیبی گرما و برق استفاده کرد. شکل ۲-۴۷ عملکرد یک پیل سوختی PAFC را نشان می‌دهد.



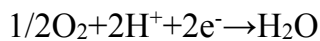
شکل ۲-۴۷: عملکرد پیل سوختی اسید فسفریک [۱۱]

واکنش‌هایی که در پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC) انجام می‌شوند به صورت زیر می‌باشند:

- واکنش آندی:



- واکنش کاتدی:



یک سیستم پیل سوختی اسید فسفریک دارای اجزاء مختلفی می‌باشد که مهمترین آنها به شرح زیر می‌باشند:

- سیستم‌های ریفورم سوخت که سوخت فسیلی را به گاز غنی از هیدروژن تبدیل می‌کنند.
 - استک‌های پیل سوختی که گاز غنی از هیدروژن و هوا را به برق تبدیل می‌کنند.
 - اینورترها که برق DC را به AC تبدیل می‌کنند.
 - سیستم‌های کنترل که تمام اجزاء را برای رسیدن به تقاضای الکتریکی و یا حرارتی کنترل می‌کنند.
- مزایای این پیل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- توان تحمل ۱ تا ۳ درصد مونواکسید کربن
 - امکان استفاده در مولدهای همزمان برق و حرارت
 - پایداری الکترولیت در محیط الکتروشیمیایی
 - سادگی سیستم مدیریت آب و دما
- به همین ترتیب معایب پیل‌های سوختی اسید فسفریک عبارتند از:

- کم بودن سرعت احیای اکسیژن

- حساسیت به H_2S

ویژگی‌های پیل‌های سوختی اسید فسفریک در جدول ۱۰-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۰-۲: خصوصیات و ویژگی‌های پیل‌های سوختی اسید فسفریک

یون هادی	دمای کارکرد ($^{\circ}C$)	نوع سوخت مصرفی [۱۲]	مرحله تکامل	دورنمای دستیابی به کاهش قیمت
H^+	۲۲۰-۱۵۰	گازوئیل، گاز طبیعی، دی متیل استر، متان، گاز شهری، گاز مایع (LP)، گاز هاضم بی هوازی فرایند شده (ADG)	کاربردهای اولیه تجاری	متوسط
چگالی انرژی الکتریکی (KW/m^3) متوسط در مقایسه با سایر پیل‌های سوختی، مصرف پلاتین به عنوان کاتالیست، دارای توانایی تحمل CO_2 و تحمل CO تا غلظت ۱-۳ درصد، بازده الکتریکی ۴۰ تا ۴۵ درصد، بازده کلی (الکتریکی و حرارتی) ۸۵ درصد که گاهی تا ۹۰ درصد هم می‌رسد.				

۳-۲-۲- کاربردهای پیل سوختی PAFC

پیل‌های سوختی PAFC به صورت ساکن برای مصارف مسکونی یا تولید پراکنده نصب شده در محل مصرف، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مثال‌هایی از کاربرد این پیل‌های سوختی عبارتند از:

- واحدهای پیل سوختی ساکن بزرگ برای تولید همزمان برق و حرارت (CHP)
- واحدهای پیل سوختی میکرو CHP برای ساختمان‌های کوچک با مصرف انرژی پایین تا ۵۰ کیلووات
- UPS ها
- تعدیل جریان برق (در هنگام تولید، مازاد برق به صورت هیدروژن از طریق الکترولیز آب ذخیره و در زمان نیاز مجدداً به برق تبدیل می‌شود)
- توزیع مناسب برق (با قرار دادن پیل‌ها در نزدیکی مراکز تولید برق از هزینه توزیع و انتقال برق کاسته خواهد شد)
- تامین برق به صورت توزیع پراکنده
- تامین برق اضطراری

۴-۲-۲- شرکت‌های تولید کننده پیل سوختی اسید فسفریک

شرکت‌های UTC و Fuji Electric تولید کننده پیل‌های سوختی PAFC می‌باشند [۱۲ و ۱۴].

۲-۴-۱- محصولات شرکت UTC

ویژگی‌های پیل سوختی تولیدی این شرکت برای کاربردهای ساکن به شرح زیر می‌باشد [۱۲]:

- توان الکتریکی خروجی ۴۰۰ کیلووات (متشکل از دو سیستم موازی ۲۰۰ KW)
- سوخت مصرفی گاز طبیعی
- راندمان الکتریکی ۴۲٪ (در سال‌های آغاز بهره‌برداری)
- حرارت خروجی ۱/۷ MMBTU/hr
- بازدهی کل سیستم ۹۰٪
- عمر ۲۰ سال (بعد از تعمیرات اساسی بعد از سال دهم، توان به ۵۰۰ KW افزایش یافت)
- قابلیت استفاده همزمان برای کاربردهای تولید توان یا حرارت
- قابلیت استفاده مازولار به طوری که می‌توان با چند مازول از این محصول به توان‌های مگاواتی دست یافت.
- آب خروجی نداشته و از آن برای تامین آب خود سیستم پیل سوختی استفاده می‌شود. به این ترتیب حداقل نیاز به مصرف آب را دارد.

- این سیستم بر اساس استاندارد CARB 2007 طراحی شده است [۱۵].

سیستم پیل سوختی این شرکت از دو واحد فرآوری سوخت (^۱FPS) و استک پیل سوختی (^۲CSA) تشکیل شده است. سیستم فرآوری سوخت، سوخت مورد نیاز برای مجموعه استک پیل سوختی را فراهم می‌کند و سوختی غنی از هیدروژن و بدون گوگرد را برای استک پیل سوختی فراهم می‌کند. استک پیل سوختی نیز حرارت مورد نیاز برای ریفورم بخار حاصل از فرایند سوخت را فراهم می‌کند. پیل سوختی اسید فسفریک شرکت UTC با مشخصات زیر با همکاری Mohegan Sun Facility ساخته شده است:

- توان سوخت ورودی: ۴۹۴ KW
- توان الکتریکی خروجی: ۲۰۰ KW
- توان حرارتی خروجی ۸۸ KW (۲۵۰ °F / ۱۲۱ °C) برای گرمایش فضای استقرار
- توان حرارتی خروجی ۱۳۲ KW (۱۴۰ °F / ۶۰ °C) برای آب گرم
- بیشینه بازدهی تا ۸۵٪

^۲Fuel Processor System

^۱ Cell Stack Assembly

شرکت UTC سابقه نصب و راه‌اندازی واحدهای تولید توان الکتریکی از ۲۰۰ KW تا ۱۱ MW را دارد که در نیویورک، کالیفرنیا، نیوجرسی، میشیگان، برزیل، روسیه، آلمان و بسیاری از کشورهای دیگر نصب شده است. معایب پیل سوختی اسید فسفریک این شرکت به شرح زیر می‌باشد:

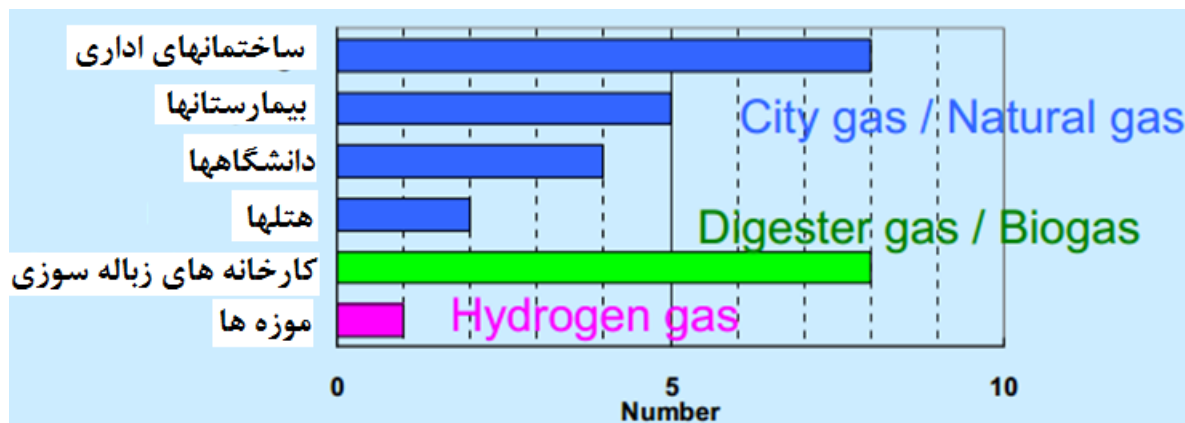
- اتلاف اسید: برای رفع این مشکل، شرکت UTC طراحی‌های سل‌ها را تغییر داده تا بتواند اسید مصرفی را بهتر مدیریت کند.

- اتصال برق خنک کننده: برای حل این مشکل خنک کننده‌های بدون اتصال طراحی شدند.
- حد ولتاژ پایین (Lower Voltage Limit) که مرتبط با حداقل بازدهی مجاز استک می‌باشد. وقتی که ولتاژ استک کمتر از این حد ولتاژ شود، استک نیاز به جایگزینی دارد، زیرا بازدهی سیستم را بسیار کاهش می‌دهد. عوامل کاهش ولتاژ و افت کارایی استک عبارتند از: از بین رفتن حالت پایدار، قطع و وصل جریان الکتریکی و آلودگی الکترودها. برای رفع پایداری استک می‌توان از کاتالیست‌های بهتر و گرانتر استفاده کرد. برای رفع مشکل قطع و وصل جریان الکتریکی می‌توان جریان سیستم را کنترل کرد و یا مواد بهتری برای کاتالیست‌ها مورد استفاده قرار داد. در نهایت اگر مشکل حد ولتاژ پایین، آلودگی الکترودها باشد، می‌توان با استفاده از کاتالیست‌های پیشرفته در سیستم فرآوری سوخت این آلودگی را از بین برد. برای مثال آمونیاک می‌تواند افت راندمان و خرابی سلول را به همراه داشته باشد [۱۳].

۲-۴-۲-۲- شرکت Fuji Electric

در سال ۱۹۲۳ شرکت Fuji Electric سرمایه‌گذاری مشترک با شرکت ژاپنی Furukawa Electric و شرکت آلمانی Siemens A.G را برای تولید ماشین‌آلات الکتریکی و تجهیزات ارتباطی-مخابراتی برای مشتریان ژاپنی آغاز کرد. این شرکت طی سال‌های ۱۹۷۳ تا ۱۹۹۰ بر روی استک‌های پیل سوختی اسید فسفریک کار کرد و سپس تا سال ۱۹۹۸ تست‌های میدانی در بیش از ۹۰ سایت بر روی استک‌های با ظرفیت‌های تولید توان ۵۰ کیلووات تا ۵ مگاوات انجام داد. به دلیل پیش‌بینی وجود بازار بزرگ و کاهش هزینه با تولید انبوه استک‌های ۱۰۰ KW پیل سوختی اسید فسفریک، بر روی استک‌ها تمرکز کرد. طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰ به تجاری‌سازی محصول خود پرداخت و توانست سیستم‌هایی با ۴۰ هزار ساعت عمر را توسعه دهد که هم اکنون تا ۶۰ هزار ساعت کار کرده‌اند. پس از آن، این شرکت سیستم‌های خود را برای کاربردهای حمل و نقل مورد استفاده قرار داد که نام تجاری آن FP-100i می‌باشد. سیستم ۱۰۰ کیلوواتی این شرکت می‌تواند در دمای هوای بین ۲۰- تا ۴۰+ درجه سانتی‌گراد کار کند.

این شرکت از سال ۱۹۹۸، تعداد ۲۸ محصول را به شهر ویسمار آلمان، شهر یاماگاتا و کیتاکیوشو ژاپن ارسال کرده است و از سوخت‌های گاز طبیعی و بیوگاز و هیدروژن خالص در آنها استفاده کرده است. شکل ۲-۴۸ مصارف گوناگون پکیج‌های FP-100i و شکل ۲-۴۹ مشخصات آنها را نشان می‌دهد [۱۶].



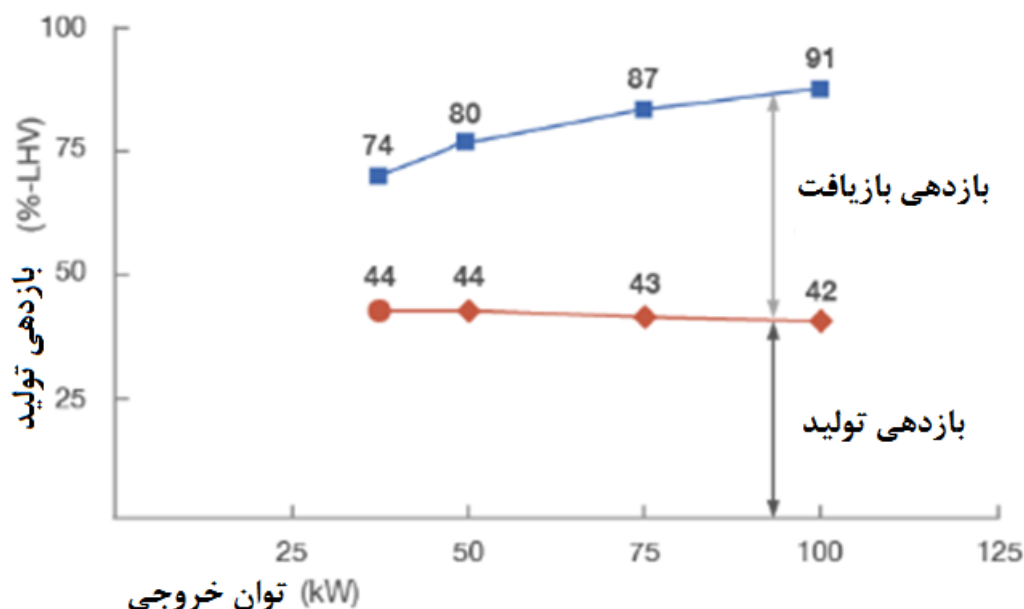
شکل ۲-۴۸: آمار مصارف گوناگون پکیج‌های PAFC 100 KW شرکت Fuji [۱۶]

نوع	گاز طبیعی	گاز هاضم	هیدروژن خالص
توان خروجی	AC 105kW		
ولتاژ خروجی / فرکانس	210V or 220V / 50Hz or 60Hz		
بازدهی الکتریکی	42% [LHV]	40% [LHV]	48% [LHV]
بازدهی کل	91% [LHV] , 123kW [When 60 deg C water is used] If 90 deg C water is used, then 50kW	90% [LHV] , 130kW [When 60 deg C water is used] If 90 deg C water is used, then 50kW	99% [LHV] , 113kW [When 60 deg C water is used] If 90deg C water is used, then 68kW
گاز خروجی	NOx : less than 5ppm [O ₂ 0%] SOx,dust : less than the detection limit		NOx, SOx, dust : none
مصرف سوخت	22m ³ /h (Normal)	44m ³ /h (Normal)	74m ³ /h (Normal)
سیستم عملکردی	Fully automated / grid-connected		
حجم W x L x H	2.2m (W) x 5.6m (L) x 3.4m (H)		
وزن	15 tons	16 tons	14 tons

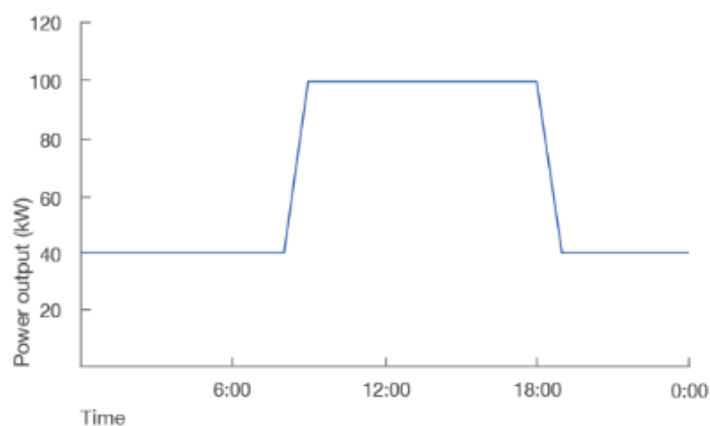
شکل ۲-۴۹: مشخصات پکیج جدید PAFC 100 KW شرکت Fuji (FP-100i) [۱۶]

پکیج‌های پیل سوختی PAFC تحت بار کم، کارایی بالایی دارند و در این محدوده بهتر از موتورهای گازی عمل می‌کنند. راندمان موتورهای گازی وقتی توان خروجی افت پیدا می‌کند کاهش می‌یابد. اما پکیج‌های PAFC می‌توانند در

طول روز توان خروجی ۱۰۰ KW و در طول شب توان خروجی ۴۰ KW را داشته باشند. شکل ۲-۵۰ بازدهی پیل‌های سوختی PAFC و شکل ۲-۵۱ توان خروجی آنها را در طول شبانه روز نشان می‌دهند [۱۷].



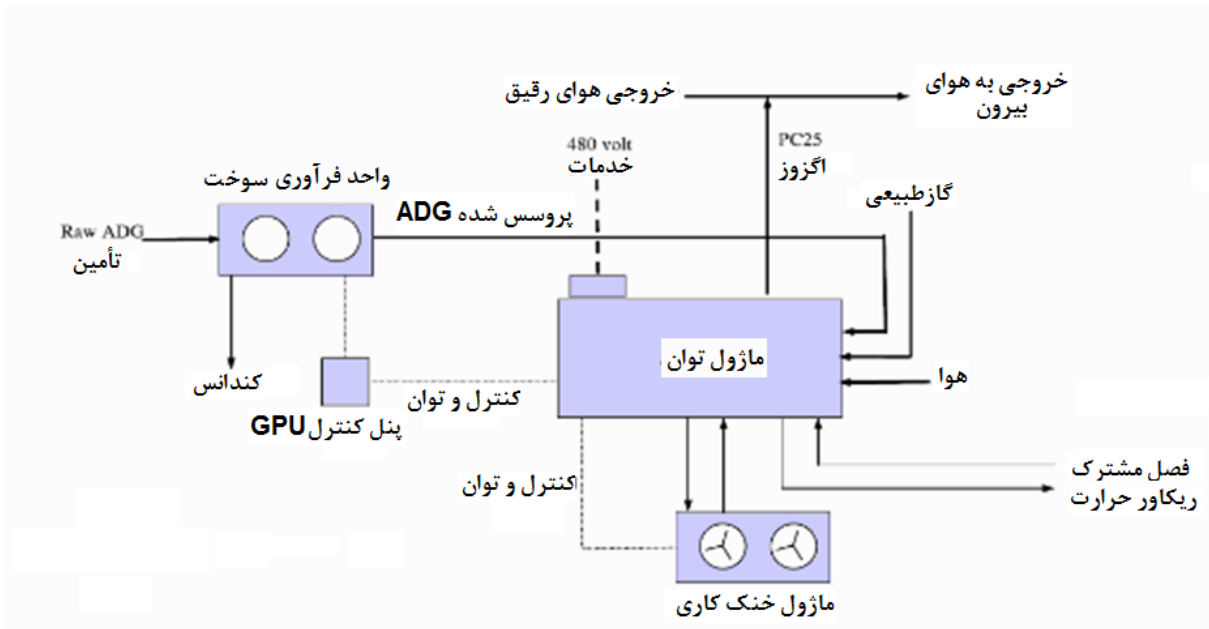
شکل ۲-۵۰: راندمان تولید برق و بازیابی حرارت پیل سوختی PAFC بر حسب توان خروجی شرکت Fuji



شکل ۲-۵۱: توان خروجی پیل سوختی PAFC بر حسب ساعت روز شرکت Fuji

فوجی، سیستم ۲۰۰ کیلووات دیگری تحت نام تجاری PC 25 با همکاری NYPA تولید کرده است. در این پروژه، گاز هاضم بی‌هوازی (ADG) که در یک ماشین کنترل آلودگی آب (WPCP) تولید شده است، به عنوان سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. PC 25 شامل واحد فرآوری گاز (GPU) بوده که ADG را قبل از آن که به عنوان سوخت وارد استک شود، فرآوری می‌کند. فوجی با همکاری NYSERDA و NYPA، ۸ سیستم PC 25 را در ۴ مرکز کنترل آلودگی آب در شهر

بروکلین در نیویورک نصب کرده است که هر سیستم با ADG تولید شده از هضم بی هوازی لجن فاضلاب تغذیه می‌شود. شکل ۲-۵۲ شماتیکی ساده از این سیستم و اجزاء اصلی آن شامل GPU، Power module و Cooling module را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵۲: شماتیک سیستم PC 25

PC 25 قادر به تولید توان الکتریکی اسمی ۲۰۰ KW در ۴۸۰ ولت و حرارت ۲۰۵ KW می‌باشد. بازدهی الکتریکی متوسط این سیستم ۳۵ تا ۴۰٪ بوده و در صورتی که حرارت اتلافی در سیستم تولید همزمان مورد استفاده قرار گیرد، بازدهی کلی تا ۸۰٪ قابل افزایش می‌باشد. ولتاژ خروجی توسط تعداد پیل‌های سوختی در استک مشخص می‌شود. ADG خام توسط GPU ساخته شده و توسط US Filter/Westates فرآوری می‌شود و به طور خاص برای یکپارچه شدن با PC 25 طراحی شده است. به طوری که سیستم PC 25 توان لازم برای پنل کنترلی GPU را فراهم می‌کند. GPU دارای یک دمنده گاز با سرعت متغیر است که برای تامین فشار سوخت ADG استفاده می‌شوند و حسگرهای فشار سوخت و مدارهای الکتریکی برای کنترل سرعت دمنده GPU استفاده می‌شوند. GPU در واقع برای حذف سولفید هیدروژن ADG به کار رفته است زیرا موجب تخریب سیستم پیل سوختی می‌شود. همچنین GPU سایر اجزاء مضر ADG مانند ذرات گوگردی و ترکیبات آلی فرار را حذف می‌کند.

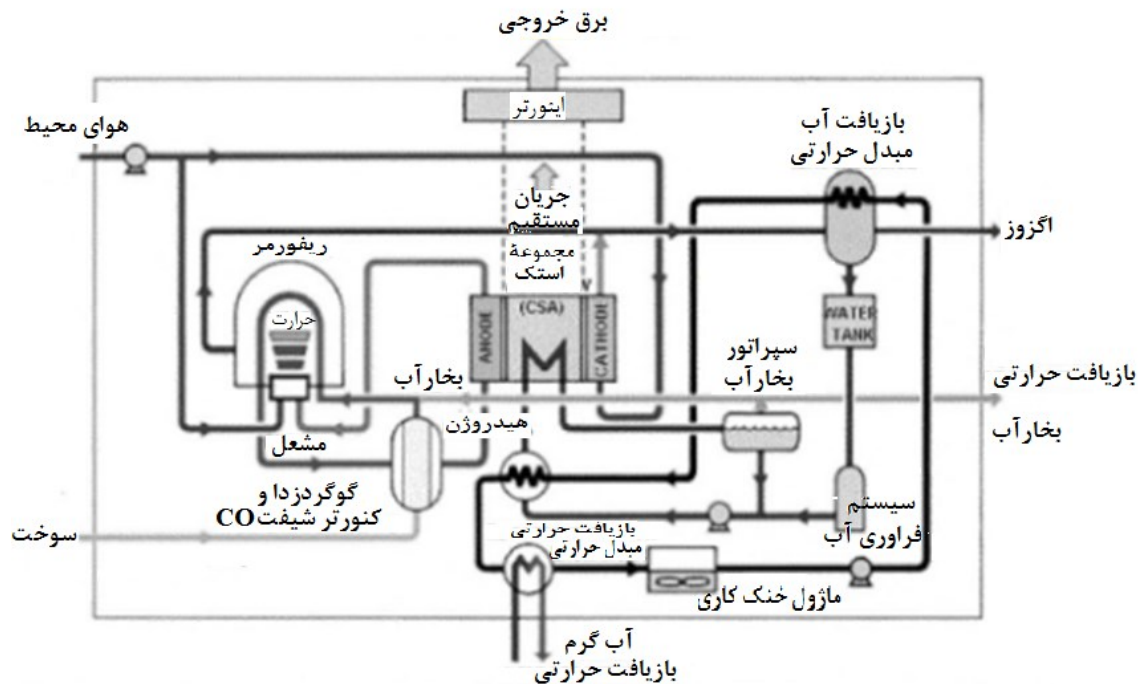
GPU شامل سه جزء مهم coalescing filter، بسترهای کربن فعال شده و دمنده می‌باشد. Coalescing filter بخار آب و ذرات جذب شده را از گاز خام حذف می‌کند. با این کار در واقع آب کندانس شده از خط سوخت حذف می‌گردد. آب کندانس شده و جمع آوری شده به سیستم تصفیه آب کارخانه برمی‌گردد. سپس، ADG خشک شده به دو بستر کربن

۶۰۰ کیلوپی که با هم سری شده‌اند، هدایت می‌شود تا H_2S و سایر آلودگی‌ها از آن حذف شود. هر بستر کربنی برای ۶ ماه کار در گاز حاوی ۲۰۰ ppm سولفید هیدروژن طراحی شده است.

اجزاء ماژول توان PC25 شامل (۱) ریفورمر سوخت، (۲) استک پیل سوختی و (۳) Power Conditioner می‌باشد. از ریفورمر کاتالیستی بخار ADG فرآوری شده در ریفورمر، سوخت ریفورم شده غنی از هیدروژن حاصل می‌شود. مقدار هیدروژن تولید شده طی فرآیند کاتالیستی ریفورم بخار آب، در مقایسه با دیگر روش‌های ریفورم بیشتر می‌باشد. همچنین، سوخت تولید شده کیفیت بالاتر و سیستم پیل سوختی بازدهی بیشتری دارد.

استک پیل سوختی می‌تواند از الکترولیت اسید فسفریک با غلظت ۱۰۰٪ استفاده کند. الکترودها از ورق کربن که با ذرات ریز پلاتین پوشانده شده‌اند، تشکیل می‌شوند. کاتالیزور در آند، سوخت غنی از هیدروژن را به پروتون تبدیل کرده و یون‌های بار مثبت هیدروژن از آند به کاتد در الکترولیت جابجا می‌شوند. الکترون‌هایی که در آند تولید شده‌اند نمی‌توانند از این الکترولیت عبور کنند و از یک مدار خارجی عبور می‌کنند و در نتیجه جریان DC را ایجاد کرده و به کاتد برمی‌گردند. در کاتد، الکترون‌ها و یون‌های هیدروژن و اکسیژن آب را تشکیل می‌دهند که از پیل خارج می‌شود. کاتالیست پلاتین در الکترودها، واکنش‌ها را سرعت می‌بخشد. پیل‌های سوختی منفرد در یک استک می‌توانند با هم ترکیب شوند. تعداد پیل‌ها در استک، ولتاژ خروجی را تعیین می‌کند. مجموعه این واکنش‌ها در پیل سوختی، برق و حرارت (محصول جانبی پیل سوختی) را تولید می‌کند.

پیل سوختی از هوا (اکسیدان) به طور مستقیم استفاده می‌کند و با هیدروژن ناخالصی که از ریفورم سایر سوخت‌ها حاصل می‌شود، کار می‌کند. دی اکسید کربنی که به صورت محصول جانبی فرایند ریفورم تشکیل می‌شود، بدون این که بر بازدهی سل اثر بگذارد، از سل عبور می‌کند. بعد از استک پیل سوختی، سوخت ریفورم شده مصرف شده به ریفورمر کاتالیستی بخار فرستاده می‌شود تا حرارت مورد نیاز برای فرایند گرماگیر ریفورم را فراهم کند. خروجی ریفورمر قبل از ورود به کندانسور با هوای مصرف شده از استک پیل سوختی ترکیب می‌شود، در نتیجه مقداری بخار آب در خروجی ریفورمر تشکیل می‌شود و سپس وارد کندانسور شده و میعان می‌شود و آب خارج شده از خروجی ریفورمر به مدار آب سرد برمی‌گردد و بخار آب کندانس نشده به محیط بیرون تخلیه می‌شود [۱۸]. شماتیک ماژول توان پیل سوختی در شکل ۲-۵۳ آمده است [۱۹].



شکل ۲-۵۳: شماتیکی از واحد تولید توان ۲۰۰ KW پیل سوختی PC25 شرکت UTC [۱۹]

این سیستم در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کند و ۲۰۰ KW توان DC تولید می‌کند که توسط Power conditioner به توان AC تبدیل می‌شود. سیستم، حرارت را از استک پیل الکتروشیمیایی (که واکنش گرمازا در آن انجام می‌شود) به سیستم فرآوری سوخت (که واکنش گرماگیر پیل سوختی در آن انجام می‌شود) با بازدهی بالا منتقل می‌کند. نتایج تست‌های این سیستم نشان می‌دهد که سیستم PC25 می‌تواند ۱۹۳ KW توان به طور پیوسته تولید کند. بیشترین نرخ تولید حرارت در دسترس در طول تست در بازه زمانی پیوسته طولانی، تقریباً 103×10^3 Btu/hr می‌باشد. بازدهی الکتریکی در بار کامل به طور متوسط ۳۶٪ است. اگر تمام حرارتی که توسط مازول خنک‌سازی گرفته شده است بازیابی شود، راندمان حرارتی ۵۶/۹٪ و راندمان کل CHP بیش از ۹۰٪ خواهد بود.

میانگین انتشار گازهای NOx در بار کامل ۱۳ lb/MWh می‌باشد. همچنین، میزان نشر CO و هیدروکربن‌ها در تمام دوره‌های تست بسیار پایین می‌باشد. بر اساس این اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و نرخ انتشار به دست آمده از تست‌ها، کاهش نشر سالانه NOx، ۴۵۰ کیلوگرم تخمین زده می‌شود. [۱۸].

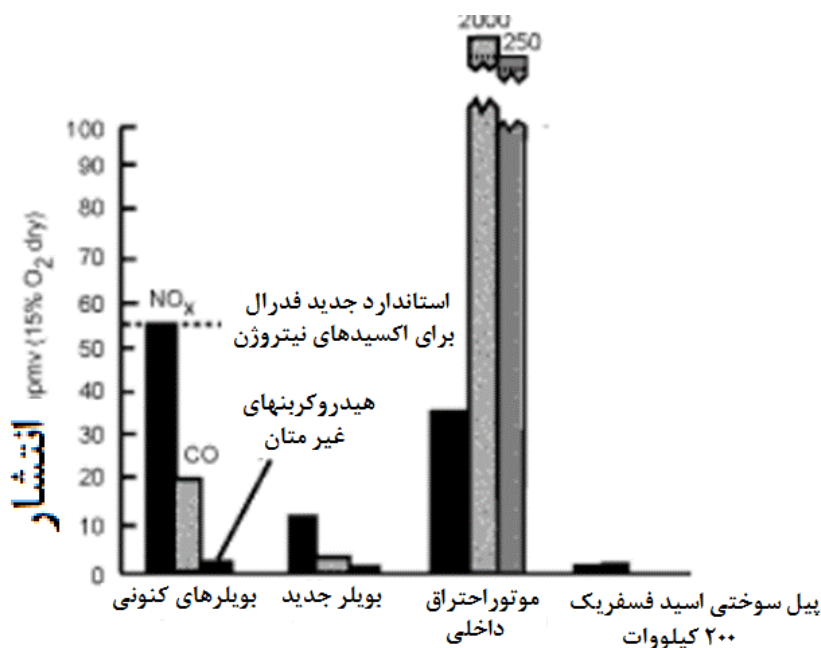
دیگر پروژه شرکت UTC، سیستم ۲۰۰ کیلووات نصب شده در شرکت IFC می‌باشد که از اوایل سال ۱۹۸۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفت [۲۰]. شرکت IFC، پروژه‌ای را در سه فاز انجام داد تا مقایسه‌ای بین پیل سوختی اسید فسفریک که با بازیابی انرژی گاز متان حاصل از واحد تصفیه فاضلاب کار می‌کند و پیل سوختی که سوخت آن گاز طبیعی است، انجام دهد. در آمریکا، گاز متانی که از تصفیه‌خانه‌ها تولید می‌شود معمولاً سوزانده می‌شود و بعضی اوقات برای مصارف

داخلی کارخانه (یا تصفیه خانه) استفاده می‌گردد. تصفیه خانه‌هایی که گاز حاصل از مرداب‌ها را به کار می‌برند، می‌توانند گاز را در کارخانه به الکتریسیته تبدیل کنند یا در کاربردهای انتقال حرارت به کار برند، و این تولید الکتریسیته موجب تولید برق کمتری در صنایع برق مرکزی می‌شود و در نتیجه انتشار CO_2 و سایر گازهای آلاینده کم می‌شود. متان حاصل از تصفیه‌خانه فاضلاب می‌تواند برای مصارف حرارتی به کار رود یا با استفاده از سایر تکنولوژی‌ها به برق تبدیل شود. اگرچه، تبدیل با استفاده از پیل سوختی فواید زیر را دارد:

۱- پیل سوختی در مقایسه با دیگر تجهیزات با سوخت گاز طبیعی، آلودگی کمتری دارد. برای مثال در نمودار شکل ۵۴-۲ پیل سوختی اسید فسفریک با بویلر قدیمی و بویلرها با تکنولوژی جدید و موتورهای احتراق داخلی مقایسه شده است.

۲- الکتریسیته با بازدهی ۴۰٪ تولید می‌شود و با بازیابی حرارت اتلافی، بازدهی تا ۸۵٪ قابل افزایش است.

۳- واحدهای تولید توان پیل سوختی در نرخ‌های پایین (۲۰۰ KW) می‌توانند اقتصادی باشند.



شکل ۵۴-۲: مقایسه میزان انتشار نیروگاه PAFC 200 KW شرکت IFC با سوخت گاز طبیعی (سال ۱۹۹۵) [۲۱]

ویژگی‌های کاری سیستم PC۲۵ واحد تولید توان شرکت UTC با کاربرد CHP که برای بیمارستان‌ها، استخرهای شنا، ساختمان‌های مسکونی و تجاری نصب شده است در جدول ۱۱-۲ آمده است.

جدول ۱۱-۲: مشخصه‌های راندمان عملیاتی و ویژگی‌های پیل سوختی PC25 250 KW نیروگاه شرکت UTC [۲۱]

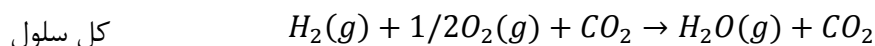
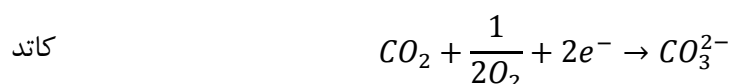
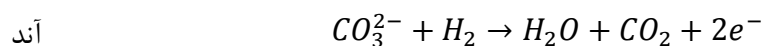
ظرفیت الکتریکی	۲۳۵kVA/۲۰۰kW
ولتاژ و فرکانس	
مصرف سوخت	گاز طبیعی ۹۹۱ لیتر بر دقیقه
بازدهی (مبنای LHV)	۸۷٪ کلی: ۳۰٪ الکتریکی و ۵۷٪ حرارتی
انتشار	کمتر از ۲ppmv CO ₂ و کمتر از ۱ppmv NOx؛ SOx ناچیز؛ براساس اکسیژن خشک ۱۵٪
انرژی حرارتی در دسترس	۲۶۳۹ وات در ۶۰°C
استاندارد	۱۳۱۹۰۰ وات در ۶۰°C
حرارت بالا	۱۳۱۹۰۰ وات در ۱۲۰°C
پروفایل صدا	۶۰ دسیبل در فاصله ۱۰ متری؛ برای فضای مسقف
توان ماژولار	قابل انعطاف برای برآورده ساختن نیازهای کنونی و آتی
امکان جابجایی	قابلیت نصب در فضای باز یا مسقف
ماژول توان	ابعاد ۵/۵×۳×۳ متر وزن ۱۸۰۰۰ کیلوگرم
ماژول سرما	ابعاد ۱/۲×۴/۲×۱/۲ متر وزن ۷۷۰ کیلوگرم

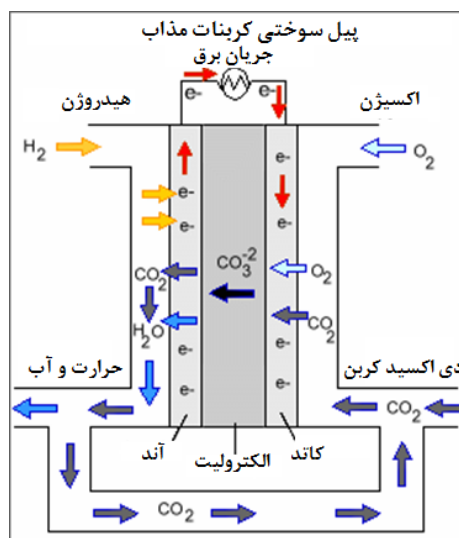
۲-۳- پیل سوختی کربنات مذاب

پیل سوختی کربنات مذاب یکی دیگر از انواع پیل‌های سوختی می‌باشد که الکترولیت آن از کربنات قلیایی مذاب تشکیل شده است. مواد به کار رفته برای الکترولیت نیز عموماً ترکیبی از ۳۲ درصد کربنات پتاسیم و ۶۸ درصد کربنات لیتیم می‌باشد. الکتروود استفاده شده در کاتد از جنس اکسید نیکل لیتیم‌دار شده است و در آند نیز از آلیاژ نیکل-کروم استفاده می‌گردد. از فولاد ضد زنگ نیز به عنوان صفحات دوقطبی استفاده می‌گردد.

در کاتد پیل سوختی، کربنات مذاب اکسیژن با دی‌اکسید کربن و الکترون واکنش داده و یون کربنات تشکیل می‌گردد. یون کربنات با عبور از الکترولیت به آند منتقل می‌شود. در آند، یون کربنات، هیدروژن را اکسید کرده و تولید بخار آب، دی‌اکسید کربن و الکترون می‌کند. الکترون تولید شده نیز از طریق یک مدار خارجی به کاتد منتقل می‌شود.

بنابراین واکنش‌های انجام شده در پیل سوختی کربنات مذاب عبارت است:

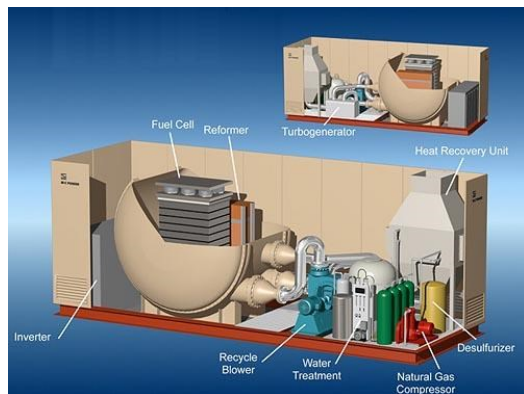




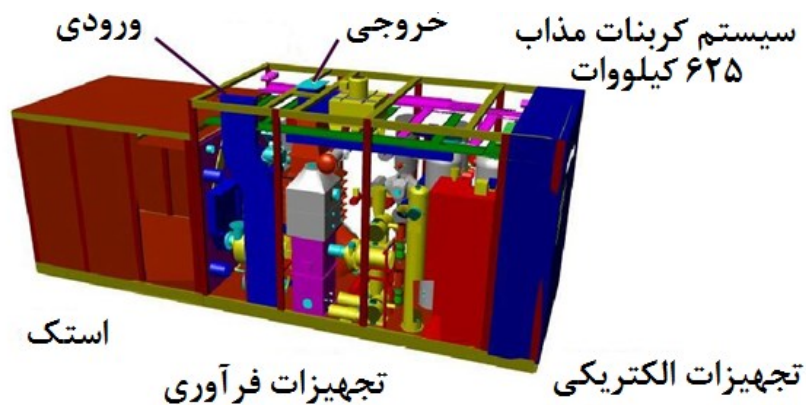
شکل ۲-۵۵: نحوه عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب

دی‌اکسید کربن تولید شده در آند این پیل سوختی باید به کاتد آن منتقل شود. لذا نیاز به سیستم چرخه دی‌اکسید کربن می‌باشد. دمای عملیاتی پیل سوختی کربنات مذاب حدود 650°C درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. از اینرو این پیل جزء پیل‌های سوختی دما بالا خواهد بود. دمای عملیاتی بالا باعث می‌شود تا علاوه بر ایجاد حرارت با کیفیت، سیستم مجهز به یک مبدل داخلی باشد و سوخت‌های فسیلی به طور مستقیم مورد استفاده قرار گیرند. همچنین این نوع پیل‌ها هیچ حساسیتی نسبت به حضور گازهای سمی مثل مونواکسید کربن ندارند و حتی این گاز می‌تواند به عنوان ورودی مورد استفاده قرار گیرد. تنها حضور گازهای دی‌اکسید گوگرد ممکن است موجب آلودگی کاتالیست‌ها شود.

پیل سوختی کربنات مذاب در نیروگاه‌های برق می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این در اولین کشتی مجهز به پیل سوختی نیز از این نوع پیل سوختی استفاده شده است (شکل ۲-۵۷).



شکل ۲-۵۶: استفاده از پیل سوختی کربنات مذاب در نیروگاه خانگی



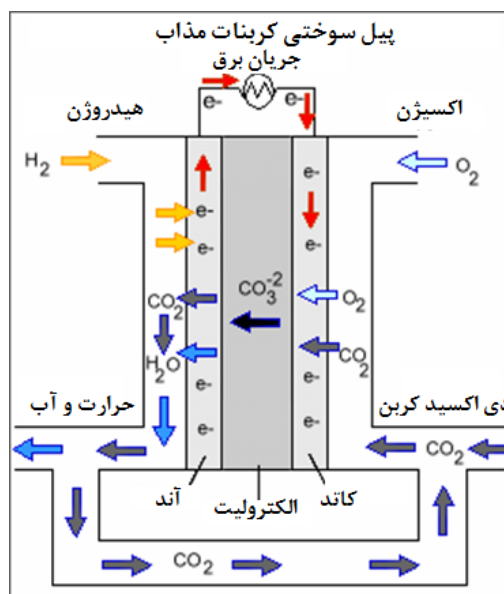
شکل ۲-۵۷: استفاده از پیل سوختی کربنات مذاب در کشتی‌ها

ویژگی‌های این نوع از پیل‌های سوختی به شرح زیر می‌باشد:

- پیل‌های سوختی دما بالا هستند که در محدوده دمایی 600°C درجه سانتی‌گراد و بالاتر کار می‌کنند.
- نیازی به ریفورمر گاز هیدروژن ندارند و با ریفورمینگ داخلی^۱ کار می‌کنند.
- بازه انرژی تولیدی این پیل‌های سوختی $3\text{ MW} - 300\text{ MW}$ می‌باشد.
- فشار کاری آنها بین ۱ تا ۸ اتمسفر می‌باشد.
- به دلیل تولید دی‌اکسید کربن، نمی‌توان این پیل‌ها را به صورت کامل به عنوان تکنولوژی پاک تلقی نمود اما به دلیل بازده خوب ($60\% - 70\%$) مورد توجه قرار گرفته‌اند.

^۱ Internal Reforming

شماتیکی از فرآیند پیل سوختی کربنات مذاب و واکنش‌های مربوطه در شکل ۵۸-۲ آورده شده است.



شکل ۵۸-۲: شماتیکی از فرآیند پیل سوختی کربنات مذاب

اجزاء پیل سوختی کربنات مذاب عبارتند از: آند که معمولاً نیکل متخلخل و آلیاژهای نیکل (آلومینیوم و کروم) می‌باشد، کاتد که معمولاً نیکل متخلخل و یا اکسید نیکل لیتید شده^۱ هستند و الکترولیت که نمک‌های کربناتی مذاب سدیم و پتاسیم هستند و توسط یک ماتریس سرامیکی نگه داشته می‌شوند [۲۰].

۲-۳-۱- کاربردهای پیل‌های سوختی کربنات مذاب

پیل‌های سوختی کربنات مذاب در بخش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که به شرح زیر می‌باشد:

الف) صنایع غذایی: مناسب فرآیندهایی که تولید گازهای بی‌هوازی می‌کنند [۲۱]. این سیستم‌ها قابلیت تولید همزمان برق و حرارت را دارند. معمولاً برای این نوع از کاربرد به حدود ۵ مگاوات نیاز است که MCFC قابلیت تامین این میزان توان را دارد. همچنین مخلوطی از گازهای طبیعی که ممکن است محصول فرآیندهای مربوط به فرآوری مواد غذایی باشند را در این نوع پیل سوختی می‌توان مصرف کرد [۲۱].

ب) مراکز حساس: در اماکن حساس مانند زندان‌ها و بیمارستان‌ها، قطع برق و یا منبع انرژی ممکن است عواقب جبران ناپذیری داشته باشد. همچنین در این مواقع ژنراتورها و یا باتری‌ها برای بازه‌های زمانی کوتاه قابل استفاده هستند که در

^۱ lithiated nickel oxide

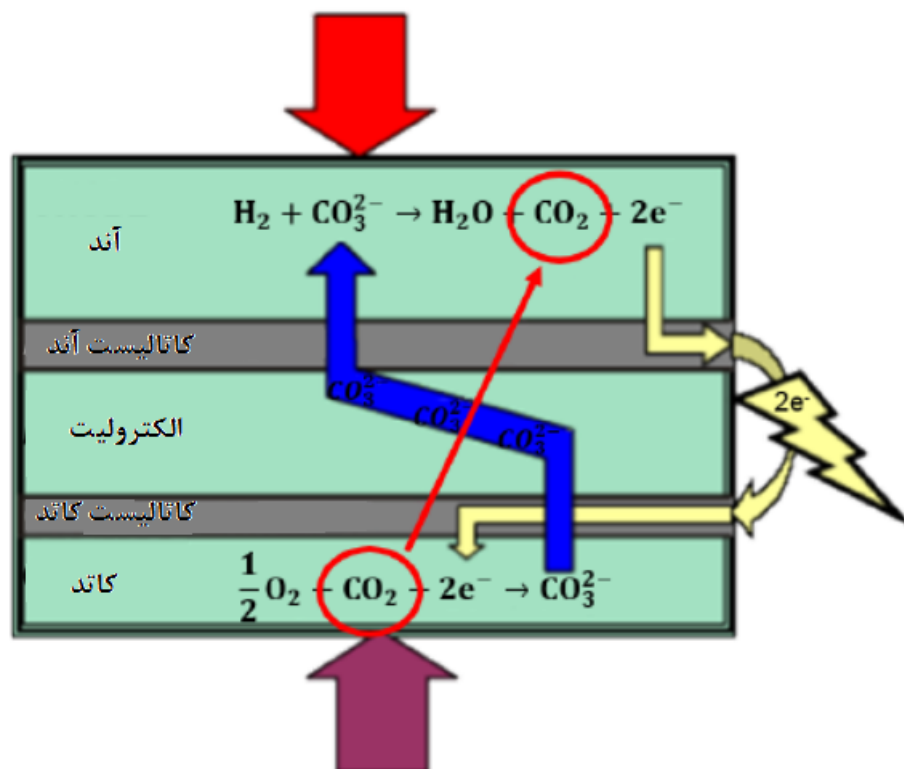
صورت قطع برق در زمان‌های طولانی با مشکل اساسی روبه‌رو خواهند شد که این نوع پیل‌های سوختی به عنوان راهکار می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۲۱].

ج) هتل‌ها و مراکز صنعتی: در مکان‌هایی مانند هتل‌ها نیز از این نوع پیل سوختی می‌توان هم به عنوان منبع الکتریسیته در مواقع قطع برق و هم به عنوان منبع گرمایشی (به صورت سازگار با محیط زیست) استفاده کرد. همچنین از گرمای تولیدی آن می‌توان برای گرم نمودن آب نیز استفاده نمود [۲۱].

د) مراکز و موسسات آموزشی: در محیط‌های دانشگاهی ایجاد لابراتورهای بزرگ با منبع انرژی‌های رایج نیاز به فضا و انرژی‌های زیادی هست که صرفه اقتصادی کمی دارند، لذا می‌توان از سیستم MCFC استفاده نمود که فضای کمی را نیز به خود اختصاص می‌دهد [۲۱].

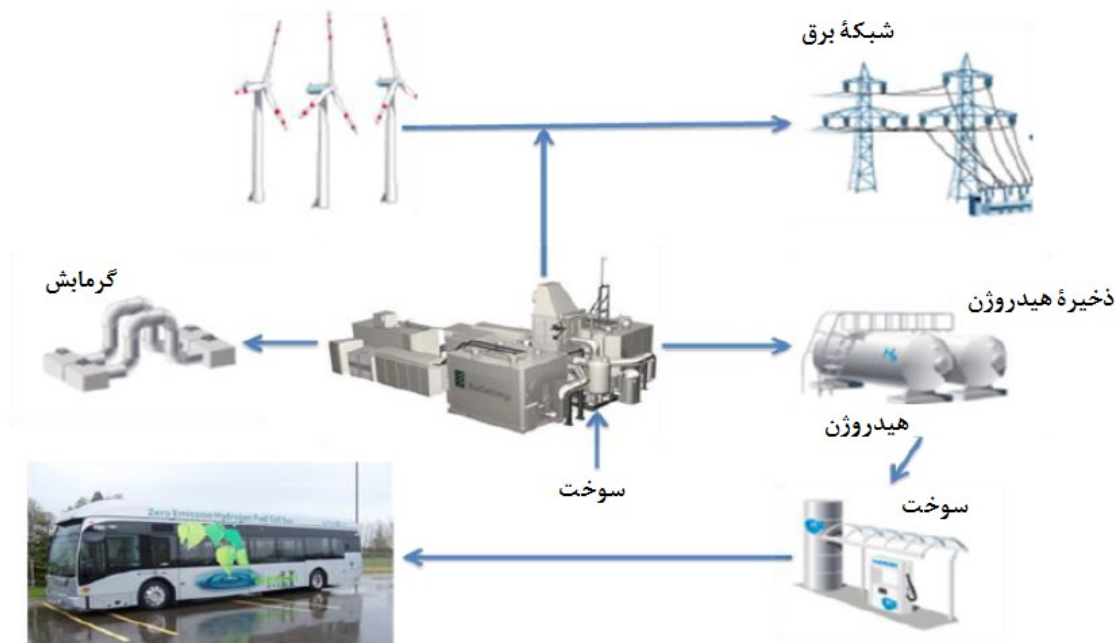
ه) تاسیسات: شرکت‌های فعال در زمینه تاسیسات از لحاظ فضا و موقعیت مکانی برای تاسیساتشان با مشکلاتی روبه‌رو هستند که می‌توان از واحدهای توان پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن استفاده نمود [۲۱].

و) جداسازی دی اکسید کربن: از سیستم MCFC برای جدا کردن دی اکسید کربن می‌توان استفاده نمود. در سمت کاتد می‌توان از جریان گازهایی که حاوی دی اکسید کربن هستند، استفاده کرد و توسط پیل سوختی از گاز ورودی آن را جدا کرد و مانع آلودگی هوا شد [۲۱]. در این حالت می‌توان دی اکسید کربن را جدا و ذخیره‌سازی نمود.



شکل ۲-۵۹: جداسازی دی اکسید کربن در پیل سوختی کربنات مذاب

ز) تولید هیدروژن: سیستم MCFC می‌تواند به عنوان سیستم ترکیبی تولید توان، حرارت و هیدروژن^۱ (CHHP) مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس هیدروژن واکنش نداده در سمت آند جمع‌آوری و ذخیره‌سازی می‌گردد [۲۱].



شکل ۲-۶۰: سیستم ترکیبی تولید توان، حرارت و هیدروژن

ز) سیستم ترکیبی با میکروتوربین: از گازهای با دمای بالای خروجی از سیستم MCFC می‌توان به عنوان منبع گرمایی برای راه‌اندازی توربین‌های گرمایی استفاده نمود. همچنین در توربین‌های انبساطی می‌توان از این گازهای خروجی به عنوان انرژی استفاده کرد [۲۱].

۲-۴- کشورها و شرکت‌های تولیدکننده و مصرف کننده MCFC

۲-۴-۱- FuelCell Energy, FCE (USA)

این شرکت با بیش از ۴۰ سال سابقه، جزء پرچمداران ساخت و صنعتی‌سازی صنایع الکتریکی در کاربردهای ساکن است. این شرکت مجموعه‌ای با ظرفیت ۹۰ MW در سال را در Torrington احداث کرده است. پروژه‌های این شرکت که بیش از ۵۰ پروژه در سرتاسر جهان می‌باشد تاکنون ۳ میلیون مگاوات ساعت برق تولید کرده است. در سال ۱۹۹۲ این

^۱ Combined Heat, Hydrogen and Power

شرکت اولین پروژه خود را در زمینه MCFC با قابلیت ۱۲۰ KW آغاز کرد و در ۶ سال بعد مجموعه‌ای با قابلیت تولید توان ۲ MW در سانتا کلارا ای کالیفرنیا تاسیس نمود. همچنین در ۱۰ سال بعد توانستند به توان ۲/۸ MW برسند [۲۱].

مهم‌ترین محصولات این شرکت عبارتند از:

- Sub-MW 300 kW DFC300
- 1.4 MW DFC1500
- 2.8 MW DFC3000

این محصولات تحت استاندارد CARB^۱ در سال ۲۰۰۷ طراحی شده‌اند. بازده الکتریکی محصولات ۴۷٪ برای کارکرد ۲۴ ساعته در ۷ روز هفته برآورد شده است. در شکل ۲-۶۱ نمونه‌هایی از محصولات این شرکت آورده شده است [۲۱].



سیستم DFC300 توان ۳۰۰ کیلووات در ولتاژ ۴۸۰ ولت و فرکانس ۵۰-۶۰ هرتز. دمای خروجی حدود ۳۷۰ درجه سانتیگراد با دبی خروجی ۱۸۰۰ کیلوگرم در ساعت می باشد. این معادل تولید همزمان ۱۴۰ تا ۲۳۵ کیلووات می باشد



سیستم DFC1500 شامل واحد بازیافت آب، تعدیل بار الکتریکی، مازول پیل سوختی، گوگردزدایی و تولید همزمان ۶۵۰ تا ۱۱۰۰ کیلووات با دبی ۸۳۰۰ در دمای ۳۷۰ درجه سانتیگراد می باشد.



سیستم DFC3000 شرکت FuelCell Energy بزرگترین نیروگاه DFC است که متشکل از ۲ سیستم ۴ مازوله می باشد

شکل ۲-۶۱: نمونه‌هایی از محصولات شرکت FuelCell Energy, FCE (USA)

انتقال گاز توسط لوله‌های انتقال باید با فشار انجام شود اما مشکلی که به وجود می‌آید این است که در مسافت‌های طولانی، افت فشار در مسیر، منجر به خنک شدن گاز به دلیل انبساط می‌شود. برای جلوگیری از یخ زدن لوله‌ها از دیگ‌های بخار استفاده می‌شود که باعث تولید حجم زیادی از گاز دی اکسید کربن می‌گردد. این شرکت با نصب پیل سوختی مستقیم (DFC^۲) در لوله‌های انتقال گاز علاوه بر تولید الکتریسیته، از حرارت تولیدی سلول‌ها نیز برای گرم کردن خط لوله استفاده کرده است [۲۱]. این روش در امریکای شمالی کاربرد زیادی دارد.

^۱ California Air Resources Board

^۲ Direct Fuel Cell

بیش از نیمی از تاسیسات پیل‌های سوختی در کالیفرنیا بر روی بیوگازهای تجدید پذیر کار و پژوهش می‌کنند [۲۱]. شرکت‌ها تحت قانون وضع شده RPS^۱ متعهد هستند که برای تولید مقدار زیادی از الکتریسیته از منابع تجدید پذیر مانند خورشید، باد و زیست‌توده استفاده کنند. پیل‌های سوختی اغلب در گروه منابع تجدیدپذیر قرار می‌گیرند. در آمریکا این شرکت‌ها در نظر دارند که به تولید ۷۷ GW از انرژی‌های تجدیدپذیر تا سال ۲۰۲۵ برسند. کره جنوبی نیز متعهد است طبق قوانین RPS تا سال ۲۰۲۲، ۱۰٪ از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر استفاده کند ولی در حال حاضر در عمل به ۱٪ رسیده است. با توجه به این که کشور کره جنوبی سوخت با قیمت بالا وارد می‌کند و از لحاظ استفاده از انرژی باد و خورشید موقعیت جغرافیایی مناسب ندارد، پیل‌های سوختی بهترین راه کار می‌باشند [۲۱].

۲-۴-۲- شرکت POSCO Energy کره جنوبی

شرکت POSCO با بیش از ۴۰ سال سابقه، بزرگترین مجموعه در زمینه انرژی با تولید ۱۸۰۰ MW در کره جنوبی می‌باشد. این شرکت با KEPCO و DFC پروژه‌های مشترک در زمینه پیل‌های سوختی کربنات مذاب (MCFC) تعریف کرده است.

بزرگترین پروژه پیل سوختی جهان در سال ۲۰۱۳ با توان ۵۹ MW توسط این شرکت در شهر Hwaseong کره جنوبی مورد بهره‌برداری قرار گرفت که منجر به توقف گرم شدن هوای این شهر گردید [۲۱]. نمایی از این واحد تولید توان در شکل ۲-۶۲ نشان داده شده است.

^۱ Renewable Portfolio Standard



شکل ۲-۶: بزرگترین واحد تولید توان پیل سوختی در جهان (۵۹ MW) در شهر Hwaseong کره جنوبی

۲-۴-۳- شرکت FuelCell Energy Solutions, FCES آلمان

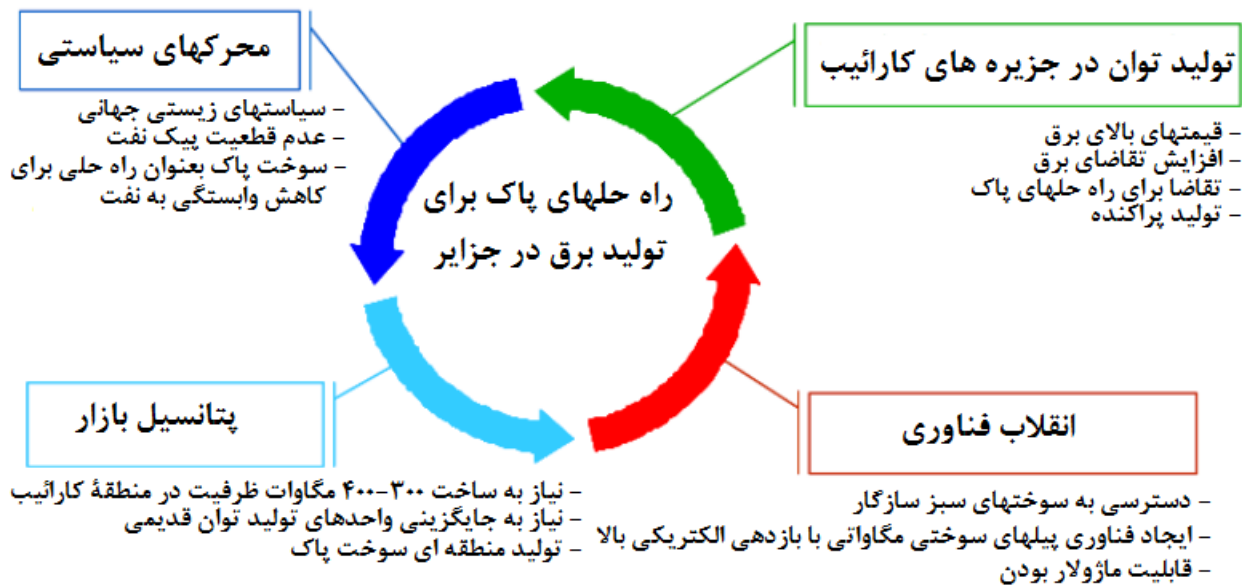
شرکت FCES در شهر Ottobrunn آلمان، واحد تولید توان با استفاده از پیل سوختی کربنات مذاب برای تولید الکتریسیته با بازده دو برابر بیشتر از تاسیسات رایج با سوخت فسیلی بنا کرده است [۲۱].

این شرکت از پیل‌های سوختی به عنوان نیروی الکتریسیته برای موتور کشتی‌ها استفاده کرده است که با قانون‌های وضع شده در مورد محیط زیست مطابقت دارد و توسط دولتمردان در اروپا مورد استقبال قرار گرفته است. هدف این شرکت نفوذ در بازارهای اروپایی می‌باشد. دولت آلمان به دلیل پاک بودن انرژی تولیدی محصولات شرکت و بازده مناسب این تکنولوژی، حمایت‌های قابل توجهی را از پروژه‌های MCFC به عمل آورده است. از اولویت‌های مهم این شرکت تحقیق بر روی کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌باشد [۲۱].

۲-۴-۴- شرکت Franco Cell فرانسه

استراتژی Franco Cell این است که به مرجعی در طراحی، ساخت و راه‌اندازی مراکز انرژی‌های سبز جهت تولید الکتریسیته با بازدهی بالا تبدیل شود. تمرکز شرکت بر روی انرژی پاک بر پایه پیل‌های سوختی MCFC با سوخت اتانول نیشکر می‌باشد. شرکت در سال ۲۰۰۶ شروع به فعالیت کرده است و اولین پروژه خود را در زمینه MCFC با هدف رسیدن به بازده الکتریکی بالای ۵۶٪ در French Caribbean انجام داده است [۲۱].

آنها برای بهبود بازده الکتریکی از موارد زیر بهره برده‌اند:



شکل ۲-۴: راه‌حل‌های شرکت Franco Cell برای تولید توان با استفاده از انرژی‌های پاک

۲-۴-۵- شرکت Cosia (Canadas oil sands innovation alliance)

این شرکت درصدد استفاده از پیل‌های سوختی MCFC برای جدا نمودن گاز دی‌اکسیدکربن از گازهای طبیعی، جلوگیری از ورود دی‌اکسید کربن به محیط زیست و همچنین تولید برق به صورت موازی در کنار تاسیسات گازی موجود می‌باشد. کار اصلی این شرکت جداسازی مواد غیرنفتی از ماسه‌های نفتی می‌باشد که برای این منظور از دو روش معدن کاری^۱ و درجا^۲ استفاده می‌کنند.

۲-۵- پیل‌های سوختی ممبران تبادل پروتونی (PEMFC)

پیل‌های سوختی کوچک با توان کمتر از ۱۰۰۰ وات برای کاربردهای قابل حمل، متحرک و خودروهای کوچک غیر شهری استفاده می‌شوند. کاربردهای کنونی و آینده این سیستم‌ها شامل پیل سوختی تک، ترکیب باتری و پیل سوختی و ترکیب باتری، سیستم‌های خورشیدی و پیل سوختی خواهد بود.

علاقه به پیل‌های سوختی کوچک از آنجا نشأت می‌گیرد که آنها قابلیت استفاده در موتورها/ ژنراتورها را دارند در حالی که بازدهی تبدیل انرژی بسیار بیشتری داشته و از نظر محیط زیستی نیز بهتر هستند. از آنجایی که این پیل‌ها چگالی انرژی بالاتری نسبت به باتری‌ها دارند، می‌توانند به عنوان جایگزینی برای باتری‌ها استفاده شوند.

^۱ Mining

^۲ In Situ

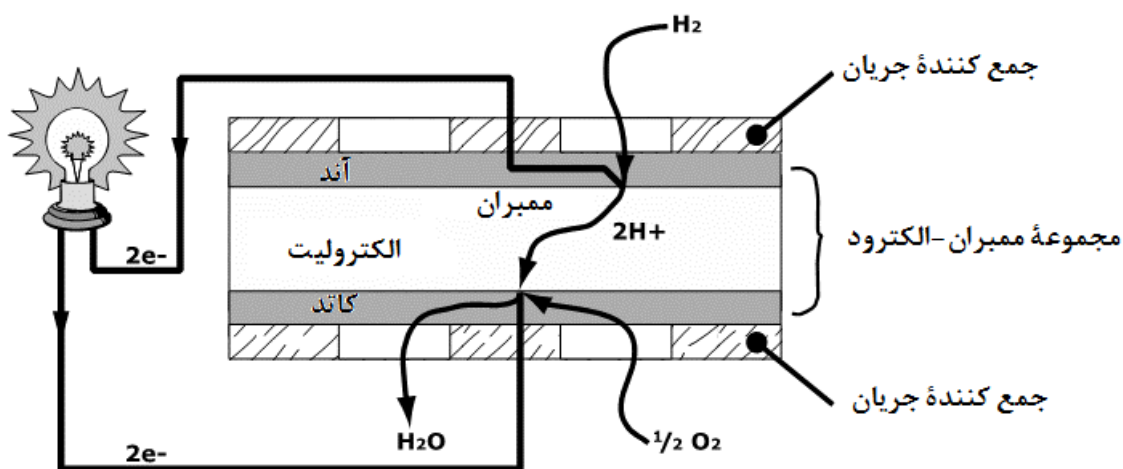
عناصر تولید توان و ذخیره‌سازی انرژی سیستم پیل سوختی از هم مجزا هستند بدین معنی که ذخیره‌سازی سوخت و استک پیل سوختی به همراه ادوات جانبی آن از هم جدا هستند. در صورتی که در باتری، اجزاء ذخیره سازی انرژی و تولید توان مشابه هم هستند. بنابراین، سیستم‌های پیل سوختی می‌توانند به نوعی طراحی شوند که مدهای بهینه را با هم مرتبط کنند به طوری که استک پیل سوختی نیاز توان را برآورده می‌کند و بخش ذخیره‌سازی سوخت نیازهای انرژی را فراهم کند. این مزیت در مواقعی که نیازهای انرژی زیاد بوده و توان مورد نیاز حداقل باشد که مربوط به کاربردهای بلند مدت می‌باشد، استفاده دارد. در این کاربردها، چگالی انرژی سیستم تنها با سیستم ذخیره‌سازی سوخت مدنظر مرتبط می‌باشد و پیل‌های سوختی نسبت به باتری‌ها دارای ارجحیت بوده و می‌توانند سیستم‌های کوچکتر و سبکتری ایجاد نمایند که به الزامات کاربردی آنها بستگی دارد. در کاربردهای ویژه‌ای که چرخه‌های کاری مدنظر باشد، هیبرید باتری و پیل سوختی مناسب خواهد بود. این نوع از کاربردها مربوط به پیک‌سایبی و رساندن بار به حد متوسط است که برای پیک‌های با دامنه کوتاه قابل انجام می‌باشد. چنین سیستمی به پیل سوختی این اجازه را خواهد داد تا بتواند در نرخ توان متوسط کار کند، در حالی که یک باتری کوچک می‌تواند توان اضافی مورد نیاز را تامین کرده و وقتی که در حالت نرمال است، باتری را شارژ کند. بنابراین سیستم‌های هیبرید هم مزایای باتری‌ها و هم مزایای پیل‌های سوختی را دارند و در بازه توانی و انرژی وسیع‌تری قرار خواهند گرفت.

همچنین انتظار می‌رود که پیل‌های سوختی کوچک، در برخی کاربردها جایگزین موتور/ژنراتورهای کوچک شوند. در این صورت، سیستم‌های پیل سوختی از نظر هزینه یا چگالی انرژی، ارجحیت ندارند، در حالی که برای کاربردهایی که عمر، اطمینان پذیری، بازدهی (مصرف سوخت)، نویز و انتشار آلاینده ها مهم باشد، سیستم‌های پیل سوختی می‌توانند تاثیرگذارتر باشند.

پیل‌های سوختی کوچک می‌توانند با بازدهی حداکثر مورد بهره‌برداری قرار گیرند به طوری که بتوانند در شرایط محیطی آماده به کار بمانند (که بتوانند به سرعت راه‌اندازی شوند)، در شرایط عادی عملکرد داشته باشند و بتوانند به سرعت به تغییرات بار پاسخ دهند، الکترولیت جامد داشته باشند و چگالی توان و انرژی منطقی بالایی داشته باشند. پیل سوختی که بتواند به بهترین نحو این معیارها را برآورده کند، مشخصاً PEMFC است. برخلاف معایب این نوع پیل که در دمای کمتر از دمای انجماد، آب مایع در پلیمر جامد تمایل به یخ زدن داشته و بدین ترتیب باعث رسانایی پروتونی می‌شود، PEMFC می‌تواند تحت شرایط انجماد در حالت آماده به کار بماند و از گرمای تولیدی خودش بهره ببرد و از شبکه با باتری برق دریافت کند که معمولاً برای شروع کار در دمای انجماد لازم است.

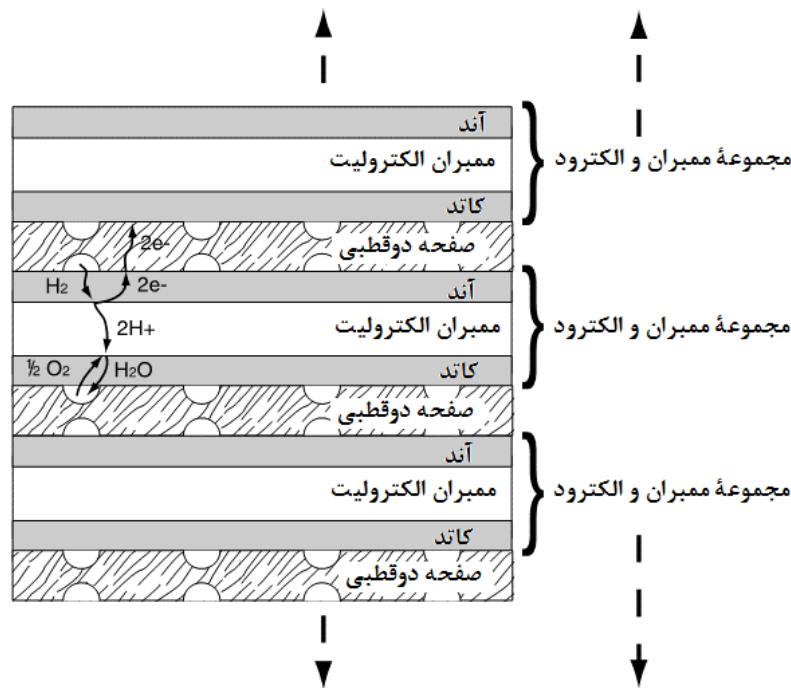
پیل‌های سوختی ممبران تبادلی پروتونی، درواقع بیشترین سهم را در توسعه پیل‌های سوختی کوچک داشته‌اند.

الکترولیت این پیل‌های سوختی الکتروشیمیایی ممبران‌های تبادل یونی به شکل اسیدی می‌باشند، بدین صورت که متخلخل بوده و یون می‌تواند از آنها عبور کند. ممبران الکترولیتی باعث انتقال جریان الکتریکی با انتقال پروتون در آند به سمت کاتد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶۵-۲ نشان داده شده است، یون‌های هیدروژن در فصل مشترک آند و الکترولیت در این فرایند تولید شده و از فاز هادی الکتریکی آند به جمع‌کننده جریان مجاور منتقل می‌شوند. یون‌های هیدروژنی که به فصل مشترک کاتد-الکترولیت می‌رسند با الکترون‌های مدار خارجی واکنش داده و با نفوذ گاز اکسیژن از ساختار کاتد به آب تبدیل می‌شوند.



شکل ۶۵-۲: شماتیک پیل سوختی با ممبران تبادل پروتونی

از آنجایی که ولتاژهای سل در این فرایند در بازه ۰/۶ تا ۰/۸ ولت هستند، سل‌های متعددی به صورت استک سری قرار می‌گیرند تا به سطح ولتاژ کاربردی برسد. در شکل ۶۶-۲ نحوه قرار گرفتن سل‌ها نشان داده شده است.

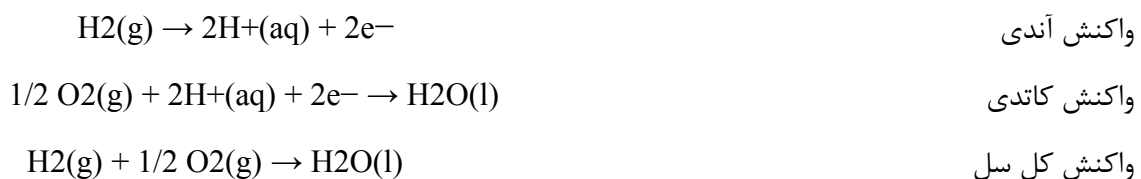


شکل ۲-۶۶: شماتیک استک پیل سوختی تبادل پروتونی

اجزاء فعال الکتروشیمیایی سل که به صورت شماتیک در شکل ۲-۶۶ نشان داده شده است به MEAs معروف است. MEA ها بین صفحات دوقطبی قرار می‌گیرند که دارای عملکردهای چندگانه می‌باشند: هادی جریان الکتریکی از سلی به سل دیگر هستند، هیدروژن و اکسیژن را در کانال‌ها روی دو طرف سطوح توزیع می‌کنند و از اختلاط این گازها جلوگیری می‌کنند و در بسیاری موارد ابزارهایی برای خروج حرارت تولید شده حین عملکرد سل فراهم می‌آورند. ولتاژ یا جریان استک با افزایش تعداد سل‌ها یا مساحت آنها افزایش می‌یابد.

پیل‌های سوختی PEM بهترین نوع برای کاربردهای متحرک هستند که می‌توانند جایگزین موتورهای احتراق داخلی گازوئیلی یا بنزینی شوند. PEMFC ها در حال حاضر برای سیستم‌های از ۱ وات تا ۲ کیلووات در حال توسعه می‌باشند. PEM ها از یک ممبران پلیمری جامد (یک فیلم پلاستیکی نازک) به عنوان الکترولیت بهره می‌برند. الکترولیت استاندارد مورد استفاده کنونی در PEM ها مواد تفلونی کاملاً فلورینه شده هستند که توسط DuPont برای کاربردهای فضایی در دهه ۱۹۶۰ تولید شده‌اند. الکترولیت‌های DuPont با برند Nafion شناخته می‌شوند و انواع مختلفی از آنها به نام‌های ۱۱۳، ۱۱۵ و ۱۱۷ شناخته شده‌اند. ممبران‌های نافین پلیمرهایی کاملاً فلورینه شده هستند که پایداری شیمیایی و حرارتی بالایی دارند. این پلیمر نسبت به پروتون‌ها در حالت اشباع از آب، تراوا بوده ولی هادی الکتریسیته نمی‌باشد. سوخت PEM ها هیدروژن و حامل بار یون هیدروژن (پروتون) می‌باشد. بهترین کاتالیست آند و کاتدی پلاتین است که با چگالی mg/cm^2 ۲۸ مورد استفاده قرار می‌گیرد. به خاطر قیمت بالای پلاتین در سال‌های اخیر، مصرف به 0.2 mg/cm^2 با افزایش توان،

کاهش یافته است. پلاتین در ماده‌ای رسانا و متخلخل مانند پارچه کربنی یا کاغذ کربنی توزیع می‌شود. PTFE اغلب به این ساختار برای هیدروفوب شدن افزوده می‌شود تا آب تولید شده را به خارج از سطح هدایت کند و آن را تبخیر کند. در آند، مولکول هیدروژن به یون‌های هیدروژن (پروتون‌ها) شکسته می‌شود. یون‌های هیدروژن از الکترولیت نفوذ کرده و به کاتد می‌رسند و الکترون‌ها نیز از مدار خارجی عبور کرده و توان الکتریکی تولید می‌نمایند. اکسیژن، معمولاً به شکل هوا به سمت کاتد می‌رود و با الکترون‌ها و یون‌های هیدروژن ترکیب شده و آب تولید می‌کند. واکنش‌های الکترودی به شرح زیر می‌باشند:



در مقایسه با دیگر انواع پیل‌های سوختی، PEMها توان بیشتری در حجم و وزن مشخص از پیل سوختی تولید می‌کنند. این چگالی توان بالا، آنها را فشرده‌تر و سبک‌تر می‌کند. علاوه بر این، دمای کاری آنها کمتر از $100^\circ C$ است که می‌تواند منجر به روشن شدن سریع آنها شود. این مزایا و توانایی آنها در تغییر توان خروجی، ویژگی‌های PEMها هستند که موجب استفاده از آنها در خودروها می‌شود.

مزایای دیگر ناشی از الکترولیت جامد است. علاوه بر این حفاظت در برابر گازهای آند و کاتد ساده‌تر بوده و مشکلات ناشی از خوردگی را برای بسیاری از الکترولیت‌ها از بین می‌برد و بنابراین عمر سل و استک را افزایش می‌دهد. یکی از معایب PEMها برای برخی کاربردها دمای کاری پایین آنها می‌باشد. دماهای نزدیک $100^\circ C$ آنقدر بالا نیستند تا بتوانند برای CHP مورد استفاده قرار گیرند. به همین ترتیب، الکترولیت نیاز دارد تا با آب اشباع باشد و کنترل دقیقی بر رطوبت آن نیاز است.

۲-۵-۱- الزامات سیستمی

۲-۵-۱-۱- سیستم تامین سوخت

سیستم‌های پیل سوختی کوچک از برخی از انواع ذخیره‌سازهای هیدروژن بهره می‌برند. در این سیستم‌ها، امکان تبدیل سوخت در فشارهای متوسط برای آند فراهم می‌شود (بین 10° تا 50° کیلوپاسکال) و آندها هیدروژن مورد نیاز برای واکنش‌های الکتروشیمیایی را در هر نرخ داده شده مصرف می‌کنند. از یک خروجی تکانه‌ای برای جمع کردن ناخالصی‌ها و آب تخلیه شده از سمت آند در بازه‌های زمانی مشخص استفاده می‌شود.

۲-۵-۱-۲- سیستم تامین هوا

استک‌های پیل سوختی می‌توانند در جریان هوای نفوذی یا همرفت اجباری کار کنند. از آنجایی که نرخ تامین هوا برای استک‌های نفوذی دشوار بوده و وابسته به هندسه آنها است، این استک‌ها عموماً کاربرد محدودتری دارند. بنابراین، تلاش برای حذف تاثیر این شرایط محیطی بر عملکرد پیل سوختی انجام شده است. این سیستم‌های نفوذی، وقتی توان کمی (تا ۲۵ وات) مد نظر باشد قابل استفاده هستند. استک‌های با جریان هوای اجباری در بازه وسیع‌تری از توان قابل استفاده هستند. هوای واکنشگر با هر فشاری که برای جبران افت فشار در استک نیاز است، قابل تزریق به سیستم می‌باشد. این عموماً در بازه ۱ تا ۲۰ کیلوپاسکال بسته به طراحی استک می‌باشد. ادوات جابجایی هوا معمولاً پمپ‌های هوای کوچک همچون پمپ‌های دوار یا انواع دیافراگمی هستند. نرخ استفاده استک از اکسیژن در هوای محیط حدود ۵۰٪ می‌باشد. هوای خروجی کلاً به اتمسفر تخلیه می‌شود.

۲-۵-۱-۳- سیستم مدیریت آب

نکته مهم در طراحی پیل‌های سوختی PEM کوچک، کنترل میزان آب تولید شده نسبت به استک پیل سوختی است. ممبران‌های الکترولیتی پایه اسید تری فلوئورومتان سولفونیک سطح مشخصی برای پذیرش آب دارند. بنابر این، در طراحی سیستم باید با توجه به مقدار بخار آب در مسیر گاز بازبینی لازم اعمال شود. الزامات رطوبتی برای جریان واکنشگر محدودیت‌های زیادی بر رژیم‌های عملکردی می‌گذارد. هوای خشک واکنشگر در سیستم‌های کوچک پیل سوختی بیشتر ترجیح داده می‌شود تا بتوان به سادگی در طراحی دست یافت. استفاده از هوای محیط از طرفی نیاز به ادوات اندازه‌گیری برای جلوگیری از خشکی ممبران دارد. نرخ دبی هوا باید برای کاهش خشکی محدود شده و در طراحی سل می‌بایستی تولید آب در نظر گرفته شود. حل خشکی مشخصاً از افزایش دمای محیط کم اهمیت‌تر است و با افزایش جریان، دمای استک متناسب با دمای محیط تغییر می‌کند. مدیریت آب محدود به جلوگیری از خشک شدن ممبران نیست. این مساله نیازمند عملکرد در نرخ‌های مصرف اکسیژن بالا هست که تمایل به تشکیل قطرات آب روی سل در کاتد را افزایش می‌دهد. نهایتاً آب در سطح یا در زیر لایه الکتروود یا در کانال‌های جریان کاتدی جمع می‌شود. این اتفاقات می‌توانند منجر به افت‌های شدید عملکردی شوند.

۲-۵-۱-۴- سیستم مدیریت حرارتی

الزامات سیستم مدیریت حرارتی برای پیل سوختی PEM به شدت به مدیریت آب بستگی دارد. همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، سطح هیدراسیون ممبران الکترولیت باید حفظ شود تا از خشک شدن سل و از بین رفتن هدایت

پروتونی در ممبران جلوگیری شود. دماهای استک باید محدود شود. خنک‌کاری سل‌های استک برای اطمینان از متوسط بودن دما و توزیع دمایی یکنواخت استک باید انجام گیرد.

خنک‌کاری استک در پیل‌های سوختی بزرگتر به طور کلی با استفاده از یک مایع خنک‌کاری که اغلب آب است، انجام می‌شود. از آنجایی که هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی حجمی مایعات بالا است، این روش بسیار موثر است. کاربردهای مربوط به سل‌های کوچک بیشتر نیازمند یک سیستم فشرده و ساده هستند و سیستم بسته خنک‌کاری با خروج حرارت برای آنها مناسب نیست. برای این استک‌های کوچک از عبور هوا از سطوح خارجی هر سل با استفاده از فن استفاده می‌شود. موثر بودن این روش عموماً با افزایش سطح خارجی سل‌ها ممکن است.

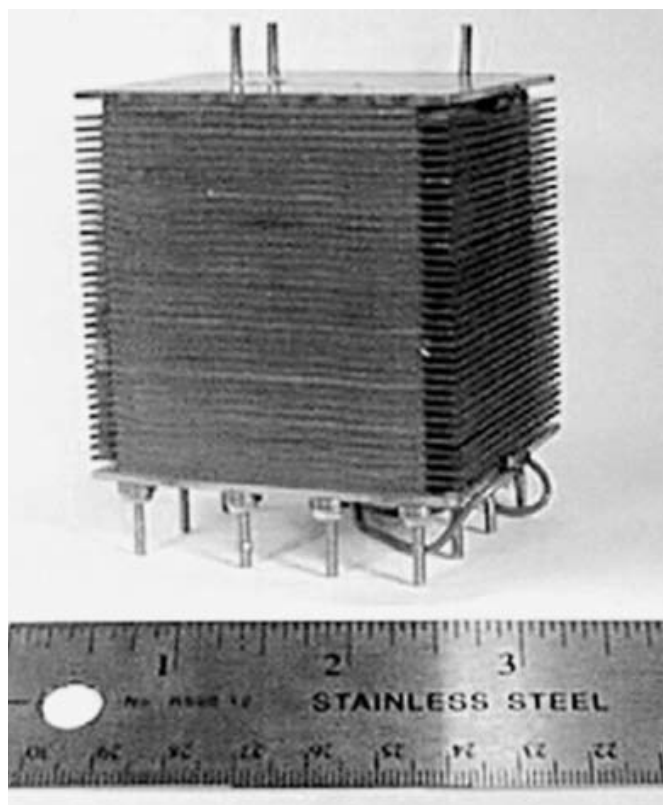
۲-۵-۱-۵- سیستم کنترل عملکرد

سیستم‌های پیل‌های سوختی کوچک (به خصوص آنهایی که با هیدروژن کار می‌کنند) باید ساده‌تر از سیستم‌های بزرگتر باشند. با این اوصاف، اجزاء کنترلی خاصی باید برای افزایش پایداری عملکرد سیستم مورد استفاده قرار گیرد. متدولوژی بیان شده برای این سیستم‌ها عبارتست از:

- نرخ دبی واکنشگر-هوا باید به عنوان تابعی از بار کنترل شود تا آب اضافی (در نرخ‌های کم) و خشکی سل (در نرخ‌های بالا) رخ ندهد. این اندازه‌گیری‌ها با جریان استک و تنظیم سرعت حرکت هوا ممکن است.
- دمای استک باید برای ممانعت از شرایط خشکی (گرم شدن زیاد) کنترل شود. این مستلزم استفاده از فن برای خنک‌کاری می‌باشد که با مشاهده سیگنال افزایش دما توسط حسگر دمای استک می‌تواند روشن شود یا سرعت آن بیشتر شود.
- از آنجایی که سیستم‌های با سوخت هیدروژن به صورت ته بسته هستند، یک تایمر برای ایجاد سیکل ته باز به یک سوپاپ سلنوئیدی در مسیر خروج برای تزریق به آند مجهز است تا ناخالصی‌ها و آب را به طور متناوب جمع کند.
- دیگر ادوات کنترلی بسته به کاربرد، قابل استفاده هستند.

۲-۵-۲- طراحی PEM

الزامات سیستم پیل‌های سوختی کوچک برای استک نیز می‌باشد و باید به صورت خارجی با هوا خنک شود و از هوای عادی استفاده کند. برای سیستم‌های با سوخت هیدروژنی، اجزاء آندی استک به صورت مجاری انتها بسته هستند. برای فشرده‌سازی سیستم، منیفولد کردن داخلی واکنشگرها، پیچ و مهره کردن و همچنین صفحات نازکتر را نیاز دارد. شماتیکی از استک سیستم سل‌های کوچک در شکل ۲-۶۷ نشان داده شده است. اجزاء سل باید حتی الامکان نازک باشند.



شکل ۶۷-۲: پیل سوختی خنک شونده با هوا

۲-۵-۲-۱- الکترولیت

مناسب‌ترین الکترولیت سیستم‌های پیل سوختی کوچک، ممبران‌های تبادل پروتونی هستند. اغلب این الکترولیت‌ها، از اسید تری فلوئورومتان سولفونیک در پلیمر پایه تترافلوئورواتیلن بهره می‌برند. وزن معادل مواد معمولاً ۱۱۰۰ می‌باشد، در حالی که وزن ۱۰۰۰ نیز قابل استفاده می‌باشد. ممبران‌های با وزن معادل کمتر تبادل پروتونی قوی داشته و خواص انتقال آب خوبی دارند اما به شرایط خشک حساسیت بیشتری دارند. ضخامت ممبران‌های مورد استفاده در پیل‌های سوختی بین ۲۰ تا ۲۰۰ میکرون می‌باشد. ممبران‌های نازک‌تر، هدایت پروتونی و نرخ انتقال آب بیشتری دارند، در حالی که ریسک بالاتری در برابر خرابی حین کار یا فرایند ساخت دارند. ممبران‌های به کار رفته در پیل‌های سوختی کوچک عموماً ضخامت حدود ۱۰۰ میکرون و یا حتی کمتر دارند.

۲-۵-۲-۲- الکترودها

الکترودهای به کار رفته در پیل‌های سوختی پلیمر عموماً از یک لایه الکتروکاتالیست متخلخل کربنی که هادی الکتریسیته است و هیدروفوب هست بهره می‌برند. لایه کاتالیستی معمولاً متشکل از پلاتین یا آلیاژ آن است که روی یک زیرلایه کربنی (carbon black) پوشش داده می‌شود که سازگاری خوبی با ممبران الکترولیتی دارد و همچنین دارای پلیمر

هیدروفوب مثل پلی تترافلور اتیلن می‌باشد. زیرلایه‌ای که به عنوان لایه نفوذی گاز واکنشگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، ممکن است ورق کربنی یا پارچه بافته شده یا نفاخته باشد. لایه کاتالیستی ممکن است مستقیماً روی ممبران الکترولیت، لایه نشانی شود یا روی زیرلایه و سپس در تماس با ممبران قرار گیرد.

آنها اغلب مشابه کاتدها هستند. آندهایی برای سوخت‌های هیدروکربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند که حاوی مونوکسید کربن هستند و عموماً از کاتالیست آلیاژ پلاتین برای افزایش مقاومت به CO بهره می‌برند. ساختار لایه کاتالیستی، برخی مواقع بین آند و کاتد جابجا شده تا هیدروفوب بودن و خواص نفوذ گاز در آن تنظیم شود. ضخامت لایه کاتالیستی معمولاً از ۱۰ تا ۲۰ μm می‌باشد که ضخامت زیرلایه بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ μm می‌باشد (در حالت غیر فشرده).

۲-۵-۲-۳ صفحات دوقطبی

ساختار عمومی PEM شامل سل‌های سری است که توسط صفحات دوقطبی از سل‌های مجاورشان جدا شده‌اند. صفحات دوقطبی باید هدایت الکتریکی را از یک سل به سل دیگر فراهم کنند، سوخت را از اکسیدان جدا و توزیع سوخت و اکسیدان را در آند و کاتد فراهم کنند. در استکی که خنک‌سازی از کنار انجام می‌شود همان‌طور که در بالا توصیف شد، صفحات دوقطبی می‌توانند حرارت را به سمت خارج استک هدایت کنند که در آنجا از جریان همرفت اجباری استفاده می‌شود. صفحات گرافیتی دوقطبی اغلب به استک‌های پیل‌های سوختی کوچک ارجحیت دارند، زیرا هدایت حرارتی بیشتری داشته و همچنین پایداری الکتروشیمیایی بیشتری دارند. این صفحات کلاً متشکل از گرافیت و رزین پلیمری هستند که با فشار قالب‌گیری شده‌اند و ساختاری بدون تخلخل را ایجاد کرده‌اند. محتوی رزین بالا تراوایی را کاهش داده اما محتوی گرافیت بالا حدود ۸۰٪ برای نیل به حداکثر رسانایی ضروری است. الزامات ضخامتی نیز باید به خاطر کانال‌های اکسیدان و سوخت و همچنین جلوگیری از نفوذپذیری واکنشگرها مورد توجه قرار گیرند. با این اوصاف، کاهش ضخامت تا ۱ میلی‌متر در مورد استک‌های کوچک قابل انجام است.

۲-۵-۲-۴ سیلنت‌ها

در لبه‌های سل‌ها برای جلوگیری از خروج واکنشگرها به اتمسفر از اجزاء متخلخل الکترود، به سیلنت نیاز است. همچنین، از آنجایی که منیفلد کردن واکنشگر معمولاً در استک در پیل سوختی کوچک داخلی است (برای رسیدن به حداکثر فشرده‌گی)، سیل کردن اطراف سوراخ‌های منیفلد برای جلوگیری از اختلاط واکنشگرها بین منیفلدها و الکترودها لازمست؛ ملاحظات مشابه حفراتی است که با پیچ و مهره سفت می‌شوند.

روش سیل کردن عموماً با استفاده از یک فریم پلیمری (گسکت) روی هر طرف ممبران الکترولیتی که الکترودها را از هم جدا کرده و از خارج نیز جدا می‌سازد. این عناصر شامل حفرات مناسب برای منیفلد کردن واکنشگرها و میله‌های بست در این مناطق می‌باشد.

۲-۵-۳- شرکت‌های تولید کننده و محصولات تجاری

شرکت‌های تولید کننده پیل‌های سوختی پلیمری (PEM Fuel Cells) در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

۱- شرکت پیل‌های سوختی پلیمری Nedstack

شرکت Nedstack یکی از شرکت‌های بزرگ و پیشرو در زمینه پیل‌های سوختی پلیمری می‌باشد که محصولات تولیدی این شرکت هم در زمینه صنعت و هم در کاربردهای مربوط به جامعه مانند کاربردهای خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از ویژگی‌های محصولات این شرکت می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- طول عمر بالا
- ایمنی بالا و اطمینان پذیری
- کارایی بالا
- محصول به روز و پیشرفته
- بدون ایجاد آلاینده‌گی
- قابلیت بازیافت

محصولات پیل‌های سوختی PEM این شرکت در طیف گسترده‌ای از کاربردهای متحرک و ساکن در ابعاد بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

این شرکت سیستم‌های یکپارچه‌ای را تولید می‌کند که با استفاده از استک‌های پیل سوختی کاربردهای مختلفی از توان را ایجاد می‌کنند.

علاوه بر تولید استک‌های پیل سوختی PEM با دانش فنی به روز، این شرکت واحدهای تولید توان PEM را ایجاد نموده است که به طور همزمان توان و انرژی را از گاز هیدروژن تولیدی در واحدهای کلرآلکالی (Chlor-alkali)، تولید می‌کنند.

در رابطه با تاریخچه این شرکت می‌توان به طور مختصر به موارد زیر اشاره نمود:

- استقلال در سال ۱۹۹۷

در سال ۱۹۹۷، بر اساس تحقیقات، AkzoNobel شروع به توسعه فن‌آوری پیل سوختی PEM کرد. AkzoNobel یک شرکت تولیدی چند ملیتی بود که در هلند قرار داشت و در زمینه محصولات بهداشتی، پوشش‌ها و مواد شیمیایی فعالیت می‌نمود. مواد مورد نیاز و فن‌آوری لازم جهت توسعه پیل سوختی (مانند غشاء، پلیمرهای فلور، کامپوزیت، کاتالیزورها و غیره) در داخل شرکت موجود بود. پیل‌های سوختی PEM برای استفاده در برخی از سایت‌های تولید AkzoNobel توسعه داده شدند. در سال‌های بعد مهندسين این شرکت توانستند فعالیت‌های PEM AkzoNobel را بر عهده بگیرند. Nedstack

در نوامبر سال ۱۹۹۸ تاسیس شد و همه دانش فنی پیل‌های سوختی PEM از شرکت AkzoNobel به Nedstack انتقال یافت.

- رشد مداوم از سال ۲۰۰۳ تاکنون

از سال ۲۰۰۳ تا کنون، سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی در قالب سهام و غیره در این شرکت صورت گرفته است. شرکت Nedstack با موفقیت به توسعه استک‌های پیل سوختی PEM چند منظوره خود ادامه داد و تکنولوژی‌های خود را در سری محصولات خود به کار گرفت. استک‌های تولیدی در کشورهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در کاربردهای مختلفی از قبیل دستگاه‌های پشتیبان با کاربرد ساکن، اتوبوس‌ها، لیفتراک‌ها، قایق‌ها و کامیون‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در سال ۲۰۰۷، شرکت Nedstack یک سیستم تولید توان در مقیاس پایلوت ۷۰ کیلوواتی PEM را در واحد کلراید Akzo Nobel در هلند نصب کرد که تاکنون عملکرد بسیار خوبی را از خود نشان داده است. همچنین در سال ۲۰۱۱، Nedstack یک واحد تولید توان ۱ مگاواتی را در سایت تولید کلراید Solvay در کشور بلژیک و نیز یک واحد تولید توان ۲ مگاواتی را در سایت تولید کلراید Ynnovate در چین نصب کرده است. محصولات شرکت Nedstack در زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ۲-۶۸: سلول‌های سوختی PEM شرکت Nedstack

داشتن بیش از یک دهه تجربه در تولید استک باعث گردیده است که بیش از ۵۰۰ سیستم پیل‌های سوختی Nedstack به صورت تجاری در سراسر جهان مورد استفاده قرار گیرند. همچنین بزرگترین سیستم پیل سوختی PEM در جهان بر اساس استک‌های پیل سوختی Nedstack ساخته شده است. استک‌های پیل سوختی تولیدی این شرکت، توانایی طول عمر بالا و بهره‌وری انرژی بالا را ثابت کرده‌اند.

شرکت Nedstack استک‌های پیل سوختی خنک شونده توسط مایع را با ظرفیت‌های ۲ تا ۱۰ کیلووات با کدهای FCS 2 تا FCS 10 را در طیف وسیعی از کاربردها در کشورهای مختلف جهان عرضه می‌کند. توان خروجی یک استک پیل سوختی بر اساس تعداد سل‌هایی که بر روی هم قرار می‌گیرند، تعیین می‌گردد. استک‌های چندتایی در سیستم پیل‌های سوختی می‌توانند به توان خروجی بیش از ۲ MWatt دست پیدا کنند.

شرکت Nedstack به صورت تجاری محصولات خود را در توان‌های مختلف با توجه به نیازهای مشتری ارائه می‌دهد که در جدول ۲-۱۲ به طور خلاصه آورده شده است. این محصولات (XXL) حداکثر طول عمر را تحت شرایط عملیاتی پایدار (خنک شونده توسط مایع) خواهند داشت.

جدول ۲-۱۲: مشخصات محصولات شرکت Nedstack.

مشخصات محصول استک‌های XXL

	FCS 2-XXL	FCS 5-XXL	FCS 8-XXL	FCS 10-XXL
برق خروجی				
توان (kW θ)	2.0	5.0	8.0	9.5
بازه ولتاژ (ولت)	9- 16	22 - 39	35 - 62	41 - 73
بازه جریان (آمپر)	0 – 230	0 – 230	0 – 230	0 – 230
مکانیکی				
وزن (کیلوگرم)	20	28	36	40
سایز (میلیمتر)	217x194x288	353 x194x288	491x194x288	550x194x288
شرایط عملکردی				
سطح دمایی و فشار ماکزیمم خنک کاری مورد نیاز (kW thermal)	3.4	8.6	14	16
		فشار محیط، 65 °C		

۲- شرکت BALLARD

شرکت BALLARD بر اساس تجربیات خود در طول سالیان متوالی، یکی از شرکت‌های پیشرو در استفاده از فن‌آوری پیل‌های سوختی PEM می‌باشد.

این شرکت فعالیت خود را از سال ۱۹۷۹ آغاز نموده است که در ابتدا بر روی تحقیق و توسعه باتری‌های لیتیومی با انرژی بالا کار می‌کرد. در سال ۱۹۸۳ سرمایه‌گذاری خود را بر روی سیستم‌های انرژی پاک با پتانسیل تجاری‌سازی انجام داد که در این راستا بر روی توسعه پیل‌های سوختی PEM فعالیت خود را انجام داده است. این شرکت در طول سالیان طولانی بر روی سیستم‌های پیل سوختی PEM فعالیت‌های متعددی را انجام داده است و در این زمینه به موفقیت‌های

چشمگیری در زمینه تجاری‌سازی دست یافته است و یکی از شرکت‌های پیشرو در زمینه پیل‌های سوختی PEM می‌باشد. به طور مختصر محصولات تولیدی این شرکت همراه با کاربرد آنها در شکل ۶۹-۲ نشان داده شده است.

کاربردها		استک‌های پیل سوختی			
حمل و نقل	تجهیزات جابجایی مواد	توان کمکی	توان پرتابل	اسم محصول	نوع محصول
	✓	✓		FCgen®-1020ACS	هواخنک
			✓	FCgen®-micro	
✓				FCvelocity®-9SSL	مایع خنک

شکل ۶۹-۲: مشخصات محصولات تولیدی شرکت Ballard و کاربردهای آنها

با بیش از ۳۵ سال سابقه توسعه محصولات، شرکت BALLARD ساخت الکترودهای غشایی خود را که جزء اصلی در استک‌های پیل سوختی PEM هستند، با فن‌آوری‌های پیشرفته انجام داده است.

- محصول FCgen®-1020ACS

با توجه به عکس‌العمل پویا، عملکرد قوی و قابل اطمینان و معماری سیستم با طراحی ساده، استک‌های پیل سوختی مدل FCgen-1020ACS شرکت BALLARD با سیستم خنک‌شونده هوا برای کاربردهای مختلفی از جمله سیستم‌های تولید توان پایین و سیستم‌های ترکیبی توان و انرژی، مناسب هستند.

از ویژگی‌های بارز این محصول می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- توان خروجی قابل توجه از ۴۰۰ وات تا ۳/۳ کیلووات
- استک Open-Cathode و Self-humidifying MEA که استفاده از سیستم‌های رطوبت‌زنی، پمپ و رادیاتور خنک کننده را حذف می‌کند.

- عمر طولانی تا ۱۰۰۰۰ ساعت که بسته به کاربرد محصول می‌باشد.

- عملکرد مقاوم و قابل اطمینان

استک پیل سوختی FCgen®-1020ACS به طور گسترده برای سیستم‌های توان پشتیبان مورد استفاده قرار گرفته است که این سیستم وابسته با سیستم سوخت هیدروژن مستقیم Ballard FCgen®-H2PM می‌باشد و این سیستم‌ها می‌توانند در ماشین‌های لیفتراک هم مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۲-۷۰: استک پیل سوختی FCgen®-1020ACS

۳- شرکت Nuvera

شرکت پیل‌های سوختی Nuvera، در سال ۱۹۹۷ تاسیس شده که در زمینه طراحی و ساخت سیستم‌های پیل سوختی و مولدهای هیدروژن فعالیت دارد. سیستم‌های تولیدی این شرکت شامل دستگاه‌های تولید هیدروژن، استک‌های پیل سوختی غشای پروتونی و بالابرها می‌باشد. این شرکت محصولات خود را در کاربردهای مختلف از جمله هوا فضا، خودرو، صنعت گاز و بازارهای سیستم‌های حمل و نقل در سراسر جهان ارائه می‌دهد. از سال ۲۰۱۴ به بعد، شرکت پیل‌های سوختی Nuvera، به عنوان شرکت زیرمجموعه NACCO Materials Handling Group، در حال فعالیت است.

شرکت Nuvera یک شرکت پیشرو جهانی در توسعه و پیشرفت فن‌آوری ریفرمینگ سوخت‌های مختلف و پیل سوختی می‌باشد.

استک‌های پیل سوختی Nuvera محصولات با تکنولوژی روز هستند که از لحاظ معماری دارای طراحی منحصر به فردی هستند. استفاده از پیل با ساختار فلزی ناهموار و جریان سیال باز به اتمسفر، باعث افزایش دوام، چگالی توان بالاتر و کارایی بهتر شده است.



شکل ۲-۷۱: استک‌های پیل سوختی Nuvera

۴- شرکت Acal Energy

شرکت ACAL Energy توسعه دهنده سیستم‌های پیل سوختی، مازول‌ها و مواد شیمیایی مصرفی برای گستره وسیعی از کاربردها از جمله کاربردهای ساکن، مسکونی و حمل و نقل که نیاز به توان بیش از ۱ کیلووات دارند، می‌باشد. طرح‌های نوآورانه این شرکت صرفه‌جویی قابل توجهی را در هزینه‌های سیستم‌های پیل سوختی داشته و باعث بهبود عملکرد در پیل‌های سوختی PEM (غشای تبادل پروتونی) شده است. این موضوع موجب افزایش استفاده از فن‌آوری PEM Fuel Cell در بازارهای مصرف خواهد شد.

فصل ۳

تبیین الزامات فنی و مهندسی

محصولات پیل‌های سوختی با کاربرد

ساکن

۳-۱- الزامات کلی

الزامات مورد نظر در مورد نصب، راه‌اندازی و استفاده ایمن از سیستم‌های پیل سوختی به طور کلی به پنج دسته تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارتند از [۲۸ و ۲۹]:

الف) الزامات مربوط به تامین و ذخیره‌سازی سوخت

ب) الزامات مربوط به نصب سیستم پیل سوختی (در فضای بسته یا باز)

ج) الزامات مربوط به اتصال سیستم به شبکه برق

د) الزامات مربوط به سیستم تهویه

ه) الزامات ایمنی و حفاظت در برابر آتش

در شکل ۳-۱ الزامات کلی مذکور در بالا برای یک سیستم پیل سوختی در یک ساختمان تجاری به صورت شماتیک نشان داده شده است. که بدین شرح می‌باشند:

(۱) پیریزی و حفاظت

(۲) سیستم‌های حفاظت در برابر آتش

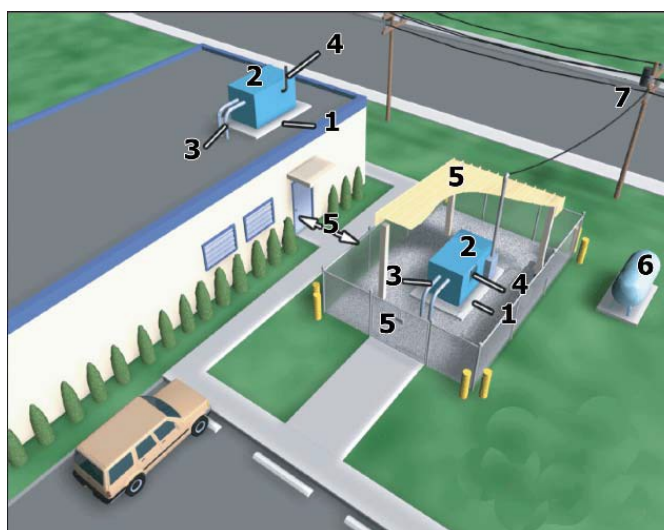
(۳) لوله‌گذاری و اجزاء مربوط به اتصالات

(۴) تهویه، سیستم خروجی گازهای حاصل و تامین هوای موردنیاز

(۵) جاگذاری، نصب و حفاظت (حفاظت از طریق نصب سایه‌بان برای نصب سیستم در فضاهای باز)

(۶) سیستم سوخت و ذخیره‌سازی

(۷) اتصال به شبکه برق



شکل ۳-۱: شماتیکی از الزامات کلی نصب یک سیستم پیل سوختی در یک ساختمان تجاری [۲۹]

جدول ۱-۳ نمونه‌ای از مواردی که در زمان نصب نیروگاه‌های پیل سوختی ساکن باید در نظر گرفته شود را بیان می‌کند.

جدول ۱-۳: شرایط نصب واحد تولید توان پیل سوختی با کاربرد ساکن

الزامات مکان نصب		
نقطه عملکرد (راندمان)	شرایط طرح	مقوله
۰ ft	۵۰۰۰-۰ ft	ارتفاع بالای سطح دریا
۵۹ °F	۱۰۴-۲۰ °F	دمای محیط
۶۰ %	۰-۱۰۰ %	رطوبت نسبی
	۳۰ PSF	بار ناشی از باد در ۳۳ ft
	۳۰ PSF	بار ناشی از برف
	۲/۵ inches/hr	بارندگی
	UBC Zone 4	زلزله خیزی
	micrograms/m ³ ۲۷	متوسط بار غبار محیط در سال
	۲۰ ppbw	متوسط غلظت هالید گازی محیط در سال
	<۱۰ ppb	غلظت دی اکسید سولفور هوا
اتصالات داخلی یوتیلیتی‌ها		
	(۱۵ psia <) گاز طبیعی با فشار کم تا متوسط	سوخت
	آب شهری برای عملیات ریفورم لازم است	آب
	الزامات برق بستگی به یوتیلیتی محلی دارد	برق
		رله‌های حفاظتی برای عملیات همزمان
الزامات پروانه		
عموما پیل‌های سوختی تعداد کمی الزام پروانه‌ای منحصر بفرد دارند		
عموما الزامات برای نصب تجهیزات قابل قیاس است		
بیشتر محصولات تجاری برخطوط راهنمای CARB ۲۰۰۷ منطبق می باشند.		
پروانه ها شامل : ۱- پروانه هوا ۲- پروانه ساختمان ۳- سلامتی و ایمنی ۴- پروانه صدا		
فاکتورهای ساخت و نگهداری		
الزامات بسته به سیستم تغییر می کند		
تمام سیستم های تجاری به منظور نگهداری از سیستم، نیاز به دسترسی برای برداشتن استک و سرویس آن دارند.		
وزن مورد توجه است.		
سیستم های کوچکتر یک دستگاه هستند و سیستم های بزرگتر اجزاء سر هم بندی شده بیشتری را در محل شامل می شوند.		

الزامات مکان نصب	
تمام پیل‌های سوختی تجاری برای نصب در خارج، به صورت کاملاً یکپارچه طراحی شده‌اند.	
الزامات فضا برای سیستم‌های تجاری مختلف	
۲۵ SF	۵ KW برق دو شاخه
۱۰۰۰-۵۰۰ SF	۲۵۰-۲۰۰ KW UTC یا FCE
۲۵۰۰ SF	1000 KW FCE

۳-۲- مخاطرات مربوط به نصب و راه‌اندازی پیل سوختی

۳-۲-۱- مخاطرات پیل‌های سوختی نسبت به هیدروژن

بسیاری از پیل‌های سوختی از هیدروژن تولید شده توسط ریفورمینگ سوخت‌های هیدروکربنی استفاده می‌کنند؛ پیل‌های سوختی با درجه حرارت عملکردی بالا می‌توانند به طور مستقیم از سوخت‌های هیدروکربنی مناسب استفاده کنند. ریفورمینگ و یا استفاده مستقیم از این سوخت‌های هیدروکربنی باعث تولید دی اکسید کربن می‌گردد. اقدامات مناسب مانند مهار نمودن گازهای خروجی و تهویه باید برای حصول اطمینان از این که جریان خروجی دی اکسید کربن به طور موثر تخلیه شده و باعث ایجاد خطر خفگی نمی‌شود، انجام شود [۳۳].

گاز طبیعی (متان) سبک‌تر از هوا است و تمایل به نفوذ در هوا به سمت بالا را دارد، اما میزان سرعت نفوذ بسیار کمتری نسبت به هیدروژن دارد. محدودیت انفجار برای گاز طبیعی (۵-۱۵ درصد حجمی) نیز بسیار کمتر از هیدروژن می‌باشد. ویژگی‌های مربوط به هر دو سوخت هیدروژن و گاز طبیعی باید برای هر سیستم با قابلیت کارکرد با سوخت دوگانه مورد توجه قرار گیرد. همچنین انجام کارهای مربوط به لوله‌کشی و تجهیزات مورد استفاده برای تامین گاز طبیعی باید مناسب باشد [۳۴].

گاز مایع (LPG) به طور قابل توجهی سنگین‌تر از هوا است، به خصوص هنگامی که دمای پایینی داشته باشد، به عنوان مثال، هنگامی که به طور مستقیم از مخزن ذخیره‌سازی مایع گرفته شده است. در صورت نشت این سیال، بخار LPG معمولاً به سمت پایین نفوذ می‌کند و ممکن است در کف یا در لایه‌های زیرین چاه‌ها جمع شود که به سرعت فضای قابل اشتعال، ایجاد می‌کند. مخلوط‌هایی که حاوی گاز LPG حدود ۲ تا ۱۰٪ حجمی در هوا می‌باشند، به راحتی آتش می‌گیرند و منفجر می‌شوند. تفاوت‌های قابل توجهی در ویژگی‌های بویانسی و پراکندگی دو سوخت وجود دارد و باید در سیستم‌هایی که در آنها سوخت‌های LPG و هیدروژن مورد استفاده قرار می‌گیرند، مدنظر قرار گرفته شود [۳۵]. انجام کارهای لوله‌کشی و تجهیزات مورد استفاده برای ذخیره و عرضه سوخت LPG نیز باید مناسب باشد و بر اساس استاندارد مناسب طراحی شده باشد.

متانول می‌تواند به طور مستقیم توسط برخی از انواع پیل‌های سوختی مورد استفاده قرار گیرد. این سوخت دارای خطرانی است که به توجه ویژه‌ای نیاز دارد. علاوه بر اینکه متانول مایعی قابل اشتعال می‌باشد، سمی نیز هست که با استنشاق، نوشیدن و به ویژه جذب از راه پوست، مخاطراتی را ایجاد می‌نماید. برای جلوگیری از ریختن و انباشت مخلوط متانول/ هوا که خطرناک می‌باشد هر زمان که از آن استفاده می‌شود، باید احتیاط‌های لازم مانند مهار گاز خروجی و تهویه انجام شود [۳۶].

در مقایسه با مخاطرات دستگاه‌ها و سیستم‌های هم‌ارز با پیل سوختی، مانند بویلرهای با سوخت گاز طبیعی و باتری‌ها، تعدادی مخاطرات برای پیل‌های سوختی باید مورد توجه قرار گیرد که فقط شامل خود پیل سوختی نمی‌باشد بلکه سیستم سوخت، ذخیره و انتقال آن را نیز شامل می‌شود.

۳-۲-۲- مخاطرات آتش‌سوزی و انفجار

برآورد مخاطرات و سطوح خطر برای بررسی پیامدهای یک حادثه ضروری است، برای مثال مخاطراتی مانند فشار بیش از حد، تابش حرارتی، پرتاب تکه‌هایی از یک تجهیز و سطح خسارت یا آسیب‌پذیری یک هدف را می‌توان نام برد. در آتش‌سوزی/انفجارهای شیمیایی که معمولاً واکنش‌های اکسیداسیون گرمازا هستند، بخش بزرگی از انرژی احتراق توسط موج انفجار در حال توسعه به صورت یکنواخت در تمام جهات پراکنده می‌شود.

بسیاری از گازهای قابل اشتعال از جمله متان و پروپان امروزه به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدون در نظر گرفتن ملاحظات ایمنی لازم، ممکن است انتشار گاز و پس از آن آتش و انفجار رخ دهد. هیدروژن خواص بسیار متفاوتی نسبت به گازهای رایج مورد استفاده دارد که برای رسیدن به سطح ایمنی قابل قبول باید ملاحظات خاصی در رابطه با گاز هیدروژن در نظر گرفته شود [۳۷].

هیدروژن برای کاربرد در پیل سوختی می‌تواند با استفاده از روش‌های زیر ذخیره‌سازی شود [۳۷]:

- گاز فشرده شده، به طور معمول در سیلندرهای گازی رایج با فشار ۲۰۰ bar ذخیره‌سازی می‌شوند، اما این فشار ممکن است در کاربردهای خاصی برای افزایش چگالی ذخیره‌سازی انرژی، افزایش یابد.
- به صورت هیدروژن مایع شده در دمای زیر ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد ذخیره می‌گردد، بنابراین در این رابطه باید بررسی‌هایی در زمینه سوختگی‌های سرد، مایع‌سازی محیط‌های غنی شده با اکسیژن و توسعه نشت مایع و در نتیجه تشکیل ابر قابل اشتعال انجام گیرد. لازم به ذکر است که بخارهایی که از طریق نشت مایع تولید می‌شوند، به دلیل دمای پایین، در ابتدا نمی‌توانند شناور باشند.

- هیدریدهای کمپلکس همچنین به عنوان یک منبع ذخیره‌سازی هیدروژن می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و معمولاً براساس هیدرید آلومینیوم سدیم یا مواد مشابه ساخته می‌شوند. این مواد، جامدات قابل اشتعال هستند و می‌توانند با آب واکنش شدیدی بدهند و در نتیجه واکنش هیدروژن و یک محلول آبی خورنده‌ای را ایجاد کنند. طراحی مناسب سیستم‌های ذخیره‌سازی هیدریدی می‌تواند از این خطرات جلوگیری نماید.

۳-۲-۳- خواص و مشخصه‌های هیدروژن

هیدروژن یک گاز بی‌رنگ و بی‌بو است که از هوا سبک‌تر می‌باشد. استفاده از گازهای بودار برای تشخیص نشت‌های هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته است، با این حال، تمام مواد شیمیایی بودار که تاکنون بررسی شده‌اند به دلیل پتانسیل‌شان به عنوان سم برای کاتالیست‌های غشایی پیل‌های سوختی مورد قبول قرار نگرفته‌اند. علاوه بر این، آنها ممکن است اثرات محدودی بر نشت‌های کوچک داشته باشند، چراکه مولکول‌های گازی بودار بسیار بزرگ‌تر از مولکول‌های هیدروژن هستند [۳۷].

هیدروژن دارای ویژگی‌های بسیاری است که به طور قابل توجهی از سوخت‌های معمولی متفاوت است و بر این اساس مهم است که در هنگام طراحی و نصب یک سیستم پیل سوختی، این خصوصیات مورد توجه قرار گیرد. مقایسه ویژگی‌های هیدروژن با دو سوخت رایج دیگر شامل گاز طبیعی و LPG در جدول ۲-۳ آمده است.

جدول ۲-۳: ویژگی و مشخصه‌های هیدروژن، گاز طبیعی خشک و پروپان گازی [۳۷]

ویژگی	واحد	گاز طبیعی خشک (متان)	LPG (پروپان)	هیدروژن
چگالی	Kg/m ³	۰/۶۵	۱/۸۸	۰/۰۹۰
ضریب نفوذ در هوا	cm ² /s	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۶۱
ویسکوزیته	cP	۰/۶۵۱	۰/۸۱۹	۰/۰۸۳
انرژی احتراق در هوا	mJ	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۰۲
محدودیت احتراق در هوا	Vol%	۵/۳-۱۵	۲/۱-۹/۵	۴-۷۵
دمای خود احتراقی	C	۵۴۰	۴۸۷	۵۸۵
گرمای ویژه	J/g.K	۲/۲۲	۱/۵۶	۱۴/۸۹
دمای اشتعال در هوا	C	۱۸۷۵	۱۹۲۵	۲۰۴۵
انرژی حرارتی ساطع شده از اشتعال گاز به محیط	%	۱۰-۳۳	۱۰-۵۰	۵-۱۰
محدودیت انفجار	درصد حجمی در هوا	۶/۳-۱۳/۵	۳/۱-۷	۱۳-۶۵
حداکثر سرعت سوختن	m/s	۰/۴۳	۰/۴۷	۲/۶

۳-۲-۴- تمایل به نشتی

۳-۲-۴-۱- ویسکوزیته پایین

گاز هیدروژن دارای ویسکوزیته بسیار پایینی است و در نتیجه جلوگیری از نشتی هیدروژن در سیستم هیدروژنی کار بسیار مشکلی است. در لوله‌کشی، هنگامی که تست فشار با استفاده از گاز نیتروژن انجام گرفته و نشتی کوچکی وجود داشته باشد، در هنگام استفاده از گاز هیدروژن در لوله‌ها نشتی موجود به مقدار زیادی برای هیدروژن خواهد بود. بررسی نشت هیدروژن از میان نقاط جوش، فلنچ‌ها، واشرها و غیره بسیار مهم می‌باشد و در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های هیدروژنی به طور ویژه باید مورد بررسی قرار گیرد.

استفاده از آب‌بندی‌ها و اجزاء مناسب در یک سیستم هیدروژنی که توسط فرد ماهر و دارای صلاحیت نصب شود، به طور قابل توجهی احتمال نشت را کاهش می‌دهد. برای سیستم‌های ذخیره‌سازی با فشار بالا، هیدروژن در حدود سه برابر سریع‌تر از گاز طبیعی و بیش از پنج برابر سریع‌تر از پروپان نشت پیدا می‌کند. با این حال چگالی انرژی پایین هیدروژن به این معنی است که میزان نشت انرژی آن بسیار پایین خواهد بود.

۳-۲-۴-۲- نفوذپذیری بسیار بالا

هیدروژن بسیار سبک‌تر از هوا است و همچنین نفوذپذیری بسیار بالایی دارد. بنابراین، برخلاف سوخت‌های گازی سنگین‌تر، اگر نشت هیدروژن در یک منطقه باز یا مکانی که تهویه در آن به خوبی رخ می‌دهد، اتفاق بیفتد، نفوذپذیری و شناوری آن به کاهش احتمال تشکیل مخلوط قابل اشتعال در نزدیکی نشت کمک می‌کند.

با این حال، همانند گازهای دیگر هنگامی که نشت در مکانی اتفاق بیفتد که تهویه در آن به خوبی انجام نگیرد یا محصور شده باشد، غلظت هیدروژن ممکن است به سرعت به سطح خطرناک برسد. با توجه به سبک بودن هیدروژن، در فضاهای بالای مکان‌های محصور شده تجمع پیدا می‌کند در حالی که گازهای دیگر، وابسته به توده نسبی آنها، در سطح زمین (LPG) یا در ارتفاع (CNG) تجمع می‌یابند. اگر تجهیزات الکتریکی محافظت نشده یا سایر منابع احتراق وجود داشته باشند، خطر انفجار امکان‌پذیر خواهد بود.

همان‌طور که هیدروژن به سرعت از میان هوا و مواد جامد در مقایسه با سایر گازهای سوختی مانند متان و پروپان پخش می‌شود، در صورت آزاد شدن، معمولاً سریع‌تر پراکنده می‌شود، اگر چه اثرات شناوری اهمیت بسیار کمتری را برای خروج گازی بسیار سریع در فشار بالا خواهد داشت. هنگامی که از تجهیزات هوشمند ایمنی استفاده شود، این شناوری و سرعت پراکندگی سریع هیدروژن می‌تواند به صورت ایمن کنترل گردد.

۳-۴-۲-۳- شناوری بالا

شناوری هیدروژن نیز می‌تواند برای مدیریت ریسک مورد توجه قرار گیرد. در این رابطه به طور معمول در حمل مواد سوختی، سوخت هیدروژن می‌تواند از منابع قابل پیش‌بینی احتراق با استفاده از پارتیشن‌های داخلی، جداسازها و اختلاف فشار جدا گردد. این امر همچنین می‌تواند با قرار گرفتن تمام منابع بالقوه احتراقی زیر سطح تجهیزاتی که هیدروژن در آنها امکان نشت و جمع شدن دارد، انجام گیرد و همچنین با تهویه مناسب و تخلیه ایمن آگزوز می‌توان ایمنی لازم را برقرار نمود.

۳-۴-۲-۵- تمایل به ایجاد شکنندگی

هیدروژن می‌تواند باعث آسیب رسیدن به مواد استیل با استحکام بالا، آلیاژهای تیتانیوم و آلیاژهای آلومینیومی گردد که در این صورت شکستگی و کاهش مقاومت فلزات در زیر استرس عملکرد، رخ خواهد داد. این امر بیشتر به میزان کربن آلیاژهای فلزی مربوط است. آلومینیوم خالص و غیر آلیاژی در برابر شکست بسیار مقاوم است. استاندارد صنعت برای اجزا در سیستم‌های هیدروژنی، درجه فولاد ضد زنگ ۳۱۶ می‌باشد. آلیاژ نیکل - مس نیز برای سرویس‌های هیدروژن مناسب است و فلز مس را می‌توان برای کاربردهای با فشار پایین مورد استفاده قرار داد.

۳-۴-۲-۶- تمایل به احتراق

۳-۴-۲-۱- بازه گسترده اشتعال‌پذیری

هیدروژن به راحتی ترکیب انفجاری با هوا تشکیل می‌دهد. محدوده ترکیب هیدروژن / هوا که باعث انفجار می‌گردد، گسترده می‌باشد. مخلوط‌هایی که حداقل حاوی ۴٪ حجمی هیدروژن هستند (که حد پایین انفجار^۱ (LEL) می‌باشد) تا مخلوط‌های ۷۵٪ حجمی (که حد بالای انفجار^۲ (UEL) است)، ممکن است باعث آتش‌سوزی شوند. بازه گسترده اشتعال‌پذیری مخلوط هیدروژن و هوا در مقایسه با پروپان و مخلوط‌های هوا - متان، ضعیفی برای سوخت هیدروژن می‌باشد. به هر حال، تفاوت‌های جزئی بین LEL هیدروژن و سوخت‌های متان و پروپان وجود دارد. LEL هیدروژن به علت اهمیت بیشتر در رتبه‌بندی خطر نسبت به محدوده اشتعال‌پذیری دیگر سوخت‌ها، توسط بسیاری از کارشناسان مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، در رابطه با آزادسازی کم هیدروژن، ویژگی‌های پراکندگی هیدروژن باعث می‌شود که احتمال تشکیل یک مخلوط قابل اشتعال کمتر گردد.

^۱ Lower Explosive Limit^۲ Upper Explosive Limit

۳-۲-۶-۲- انرژی احتراق بسیار پایین

انرژی لازم برای شروع یک انفجار هیدروژن/هوا بسیار اندک است. انرژی احتراق برای مخلوط هیدروژن/اکسیژن به نسبت ۲ به ۱ فقط حدود 0.2 MJ است. این مقدار از یک‌دهم انرژی سوخت‌های دیگر مانند متان، LPG یا بنزین کمتر است. حتی جرقه‌های بسیار کوچک، مانند جرقه‌هایی که با پوشیدن انواع خاصی از لباس تولید می‌شود، قادر به احتراق مخلوط هیدروژن و هوا خواهد بود و باعث ایجاد انفجار می‌گردند.

۳-۲-۶-۳- احتراق خود به خود

گاز هیدروژن توانایی احتراق خود به خودی در هنگام آزادسازی به طور ناگهانی از مخازن فشرده را دارد.

۳-۲-۷- پیامدهای آتش‌سوزی / انفجار

۳-۲-۷-۱- شعله نامرئی

هیدروژن با یک شعله نامرئی سوخته می‌شود که امکان تشخیص آتش‌سوزی هیدروژن را سخت می‌کند. این انتشار ظاهری کم شعله‌های هیدروژن (شار حرارتی تابشی کل) می‌تواند انتقال حرارت تابشی را به اجزاء نزدیک شعله کاهش دهد، بنابراین باعث کاهش خطر آتش‌سوزی ثانویه و سوختگی می‌شود. با این حال، چنین اثراتی به اندازه کافی محاسبه نشده است و کار بیشتر در این زمینه مورد نیاز است.

۳-۲-۷-۲- سرعت سوختن سریع

حداکثر سرعت سوختن مخلوط هیدروژن و هوا حدود هشت برابر بیشتر از مخلوط‌های گاز طبیعی و پروپان است. سرعت سوختن بالای هیدروژن، کار محدود کردن یا توقف آتش‌سوزی و انفجار هیدروژن را سخت می‌کند، به ویژه در محیط‌های بسته این کار بسیار مشکل خواهد بود. با این حال، این سرعت زیاد سوختن به این معنی است که آتش‌سوزی‌های هیدروژن، انتقال حرارت کمتری نسبت به سایر سوخت‌های گازی به محیط اطراف منتقل می‌نمایند، بنابراین خطر ایجاد آتش‌سوزی‌های ثانویه در مواد اطراف آتش‌سوزی کاهش می‌یابد. یکی دیگر از اثرات منفی سرعت سوختن بالای هیدروژن این است که باعث افزایش فشار انفجار می‌گردد و سرعت افزایش فشار آن از سایر سوخت‌ها بیشتر می‌باشد.

۳-۷-۲-۳- امکان انفجار

مخلوط‌های هیدروژن و هوا، تمایل بیشتری به منفجر شدن نسبت به مخلوط هوا با سایر سوخت‌های قابل اشتعال معمول دارند. انفجارات حاصل از هیدروژن باعث خسارت‌های بیشتر و خطرناک‌تری از انفجارهای معمولی می‌شود. با این حال، با توجه به ویژگی‌های پراکندگی سریع هیدروژن، این احتمال فقط در یک فضای محدود یا بسته وجود دارد.

فصل ۴

استانداردهای بین‌المللی بر اساس
کاربرد مشترک بین پیل‌های سوختی
و سیستم‌های مرسوم قبلی

استانداردهای کلی در رابطه با سیستم‌های مشابه با سیستم‌های پیل سوختی با کاربرد یکسان به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- استاندارد NFPA 853: درباره نصب تاسیسات پیل سوختی با کاربرد ساکن می‌باشد.
- ۲- استاندارد NFPA 70 (NEC), Article 692: مربوط به نصب تاسیسات الکتریکی می‌باشد.
- ۳- استاندارد ANSI/CSA America FC 1-2004: برای طراحی/ساخت سیستم با عملکرد ایمن می‌باشد.
- ۴- استاندارد IEEE P1547 برای اتصالات داخلی بین منابع پراکنده تولید توان با سیستم‌های الکتریکی می‌باشد.
- ۵- استاندارد UL 1741 برای اتصالات داخلی بین منابع پراکنده تولید توان با سیستم‌های الکتریکی می‌باشد.

۴-۱- استاندارد NFPA 853

استاندارد NFPA 853 شامل نکاتی درباره نصب تاسیسات پیل سوختی با کاربرد ساکن می‌باشد که در زیر عنوان شده‌اند [۲۲ و ۲۳].

- شکل کلی تجهیزات
- قرارگیری و اتصالات
- منبع سوخت و ذخیره‌سازی آن
- تهویه
- محافظت در برابر آتش‌سوزی

۴-۲- استاندارد NFPA 70

این استاندارد شامل نکاتی در رابطه با تاسیسات الکتریکی می‌باشد که در زیر عنوان شده‌اند [۲۲ و ۲۴].

- الزامات مربوط به مدارات
- ✓ اندازه مدار و جریان الکتریکی
- ✓ محافظت در برابر جریان اضافی

- ادوات قطع برق
- روش‌های سیم‌کشی
- روش‌های اتصال به زمین
- علامت‌گذاری‌ها

- اتصال به دیگر مدارات الکتریکی (Article 692.65, 2008 NEC)

۳-۴- استاندارد ANSI/CSA America FC 1-2004

استاندارد ANSI/CSA FC 1-2004 نکاتی درباره طراحی سیستمی که عملکرد آن به صورت ایمن باشد را بیان می‌کند [۲۲]. در این استاندارد موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

- ساخت، عملکرد و اطمینان از کیفیت
- لیست مراکز تست‌های استاندارد ملی
- ادوات نرم‌افزاری کنترلی ایمنی
- ادوات سخت‌افزاری کنترلی ایمنی
- امکان قطع دستی

برای مثال شماتیکی از این موارد ایمنی در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: شماری از موارد ایمنی بر اساس استاندارد ANSI/CSA FC 1-2004

۴-۴- استاندارد IEEE 1547

استاندارد IEEE سری ۱۵۴۷ یک سند بنیادی برای اتصالات داخلی سیستم الکتریکی نیروگاهی یا رشته‌ای با منابع انرژی توزیع شده می‌باشد [۲۶].

۴-۴-۱- IEEE Standard 1547 (2003)

این استاندارد از اولین سری استانداردها در مورد DER^۱ می‌باشد. DER شامل ژنراتورهای توزیع شده و سیستم‌های ذخیره انرژی می‌باشد. IEEE 1547 شامل نیازمندی‌هایی همچون عملکرد، اجرا، تست، ایمنی و مراقبت‌ها و محافظت

^۱ Distributed Energy Resources

های اتصالات داخلی می‌باشد. این استاندارد شامل مسائل عمومی، پاسخی برای شرایط غیرعادی، کیفیت انرژی، شرایط محیطی و زمین‌شناسی و شرایط مخصوص تست و نیازمندی‌هایی برای طراحی، ساخت، محاسبات نصب، کمسیون و تست‌های دوره‌ای می‌باشد [۲۶].

همچنین این استاندارد در مورد مسائل عمومی اتصالات داخلی DER مانند ماشین‌های هم‌زمان‌کننده و معکوس‌کننده‌ها و تبدیل‌کننده‌ها می‌باشد. این استاندارد در مورد تمام تکنولوژی‌های DER برای ظرفیت‌های 10 MVA و کمتر با اتصالات داخلی رایج (سیستم‌های برق^۱ (EPSs) در ولتاژهای توزیع اولیه / ثانویه معمول) می‌باشد. تمرکز اصلی این استاندارد بر نصب DER در سیستم‌های توزیع اولیه و ثانویه شعاعی^۲ می‌باشد و برای DER با منبع Hz ۶۰ نوشته شده است. در حالی که 1547 شامل خصوصیات و نیازمندی‌های تست‌های اتصالات داخلی است اما شامل نحوه انجام تست نمی‌شود [۲۶].

IEEE Standard 1547.1 (2005) - ۲-۴-۴

نحوه انجام تست و محاسبات مربوطه در استاندارد مذکور آورده شده است. این استاندارد تست‌های نوع، تولید و راه‌اندازی را مشخص می‌کند که باید عملکرد اتصالات و تجهیزات DER مطابق استاندارد 1547 به اثبات برسد و نشان داده شود [۲۶].

IEEE Standard 1547.2 (2008) - ۳-۴-۴

این بخش از استاندارد 1547، شامل توضیحات اساسی درباره نیازمندی‌های استاندارد 1547 می‌باشد و توضیحات فنی، شماتیک‌ها و توضیحات کاربردی و مثال‌هایی از اتصالات داخلی برای بهبود استفاده از استاندارد 1547 در آن بیان شده است [۲۶].

IEEE Standard 1547.3 (2007) - ۴-۴-۴

شامل راهنمایی‌هایی برای نمایش دادن، تبادل اطلاعات و کنترل در اتصالات داخلی DER می‌باشد. این استاندارد مجرای تبادل اطلاعات را مشخص می‌کند و شامل یک الگوی توافقی تبادل اطلاعات می‌باشد که شامل چهارچوبی است دربرگیرنده مشخصات تکنولوژیکی و پروسه‌های موردنیاز برای ساپورت ارتباطات و ارتباط تجهیزات یک قسمت با قسمتی دیگر [۲۶].

^۱ Electric Power Systems

^۲ Radial

IEEE Standard 1547.4 (2011) – ۵-۴-۴

شامل اطلاعات مفیدی راجع به طراحی، عملکرد و یکپارچگی میکروگریدها، یا سیستم‌های جزیره‌ای DER که به شبکه توزیع متصل هستند، می‌باشد. سند 1547.4 به توانایی جداسازی و اتصال مجدد بخش مشتریان به بخش شبکه اصلی نیز پرداخته است [۲۶].

IEEE Standard 1547.6 (2011) – ۶-۴-۴

بخش ششم IEEE 1547 (۲۰۰۳) شامل الزامات برای توزیع شبکه‌های ثانویه است – توپولوژی‌های مدار که بسیار قابل اعتماد هستند زیرا مدارهای اضافی و پشتیبان به مشتری می‌دهند. سند 1547.6 دید کلی راجع به طراحی، اجزاء و عملکرد سیستم‌های شبکه توزیع ثانویه می‌دهد. همچنین درباره ملاحظات پیرامون اتصال داخلی DER با شبکه‌های توزیع توضیح می‌دهد. همچنین این استاندارد شامل راه‌حل‌های بالقوه‌ای برای اتصال داخلی DER به سیستم‌های شبکه توزیع نیز می‌باشد [۲۶].

IEEE Standard 1547.7 (2013) – ۷-۴-۴

سند مذکور در ارتباط با ضوابط و مطالعات مهندسی بر روی شبکه توزیع که می‌توانند از سیستم‌های DER تاثیر بپذیرند، می‌باشد. این سند اطلاعاتی پیرامون مطالعات تاثیرگذاری سیستم‌های توان الکتریکی، رفع محدودیت‌های شبکه و یا بحث‌های تجاری و تعرفه‌های مربوط به اتصالات داخلی را شامل می‌شود. همچنین شامل اطلاعاتی درباره یکپارچه‌سازی اجزاء الکتریکی می‌باشد [۲۶].

IEEE Standard P1547.8 – ۸-۴-۴

این سند شامل نکاتی درباره کنترل‌ها و ارتباطات شبکه‌ای می‌باشد که در زیر عنوان گردیده‌اند:

- اینورتورهای پشتیبانی کننده از شبکه
 - اینورتورهای چندتایی و میکروشبکه‌ها
 - اطلاعات برای رفتار گروهی از DER و تعامل با تجهیزات شبکه (هم از لحاظ عملیاتی و هم از لحاظ ایمنی)
 - پاسخ سیستم اتصال شبکه‌ای به شرایط غیرعادی
 - ارائه مثال‌های کاربردی از قبیل اقدامات حفاظتی با پیشرفته‌ترین و به‌روزترین تکنولوژی‌ها و روش‌های پیشرفته در مقابله با مخاطرات غیرمنتظره در جزیره‌های DER.
- به کار گیری سند P1547.8 سبب پیشرفت در بعد نرم‌افزاری و سخت‌افزاری می‌گردد و به موثر شدن استاندارد مورد توافق کمک می‌کند [۲۶].

IEEE Standard 1547a (2014) – ۹-۴-۴

این استاندارد تجدیدنظری برای سند 1547 می‌باشد که شامل سه ویژگی مهم عنوان شده در زیر می‌باشد [۲۶]:

- تنظیم ولتاژ

- گذر از ولتاژ^۱

- گذر از فرکانس^۲

این اصلاحیه به سیستم DER اجازه پشتیبانی در ارتباط با تنظیم ولتاژ شبکه و فراهم نمودن گذار از ولتاژ و فرکانس، می‌دهد.

در اصلاح ۱، بیان گردیده است که اپراتورهای شبکه توزیع و DER های مجاز نیازمند به هماهنگی با یکدیگر و تایید در استفاده هستند. این سیستم اجازه می‌دهد که از شبکه قوی‌تری در تاسیسات استفاده گردد [۲۶]. در این اصلاح، فرکانس و ولتاژ کاری مورد نیاز گستره زیادی را پوشش می‌دهد و انعطاف‌پذیری شرایط کاری افزایش می‌یابد [۲۶].

IEEE Standard P1547.1a - ۱۰-۴-۴

این سند تست‌های قابلیت تنظیم ولتاژ تجهیزات و گذار از ولتاژ و فرکانس را پوشش می‌دهد. در این اصلاحیه تجهیزات DER با پشتیبانی از تنظیم ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

چهار نکته کاربردی راجع به تجهیزات اتصالات داخلی تحت تست (EUT)

- EUT به تغییرات ولتاژ بر اساس ویژگی‌های پاسخ اعلام شده توسط سازنده، پاسخ می‌دهد.
- EUT به تنظیمات ارتباطی بر اساس پروتکل مشخص شده سازنده و ابزار ارتباطاتی پاسخ می‌دهد.
- EUT به یک برنامه زمانبندی بر اساس ویژگی‌های پاسخ مشخص شده توسط سازنده اشاره دارد.
- EUT به تغییرات در توان خروجی با توجه به خروجی توان واقعی بر اساس ویژگی‌های پاسخ مشخص شده توسط سازنده واکنش نشان می‌دهد.

این روش‌های تست پیشرفته به گونه‌ای هستند که امکان صدور گواهی‌نامه برای ویژگی‌های جدید را فراهم می‌کنند [۲۶].

۵-۴ - استاندارد UL 1741

استانداردی برای اتصالات داخلی بین منابع پراکنده تولید توان با سیستم‌های الکتریکی می‌باشد [۲۲]. در این استاندارد به موارد زیر پرداخته شده است:

^۱ voltage ride through

^۲ frequency ride through

- اینورترها، کانورترها و کنترلرها برای استفاده در سیستم‌های تولید توان مستقل
- محافظت در برابر جزیره‌ای شدن

۴-۶- استانداردهای تکمیلی

به غیر از این استانداردها که کدهای اصلی مشترک بین سیستم‌های پیل سوختی و سیستم‌های رایج هستند، استانداردهای متعدد دیگری نیز هستند که باید مورد توجه قرار گیرند. در ادامه به شرح این استانداردها به طور مختصر پرداخته می‌شود که برای ایجاد الزامات کلی در مورد سیستم‌های پیل سوختی مورد نیاز است.

استاندارد NFPA 251: در مورد مقاومت ساختمان‌ها در برابر آتش‌سوزی است. بر طبق این استاندارد، اتاق محل نصب باید در طبقه‌ای جدا از سایر اتاق‌ها باشد و حداقل باید ۱ ساعت مقاومت در برابر آتش‌سوزی داشته باشد. استاندارد NFPA 80 در مورد درهای آتش و دیگر ادواتی که باید حین آتش‌سوزی باز شوند، است. درب‌های خروج اضطراری در مواقع آتش‌سوزی باید طبق استانداردهای زیر نصب شوند. استاندارد NFPA 90A برای نصب سیستم تهویه هوا و تخلیه است. کپسول‌های آتش‌نشانی نیز باید بر طبق این استاندارد نصب شوند.

استاندارد NFPA 101 هر اتاق را ملزم به داشتن راه خروج می‌نماید. استاندارد ANSI A13.1 شامل تمامی مسائل مربوط به لوله‌کشی سوخت گازی که خارج از سیستم پیل سوختی است، می‌باشد همچنین استفاده از رنگ‌های استانداردها و مشخص کننده بر روی تاسیسات لوله‌کشی سوخت باید مطابق با این استاندارد باشد.

استاندارد NFPA 2 و NFPA 55 فواصل مخازن سوخت غیر توده‌ای از دیگر تجهیزات و مخازن را مورد بررسی قرار داده‌اند. می‌توان از حصارهای آتش‌نشانی برای کاهش فاصله موردنیاز در سیستم‌های ذخیره‌سازی استفاده کرد [۲۷]. استانداردهای NFPA 2 و NFPA 55 دارای ضوابط متفاوتی برای کاهش فاصله موردنیاز می‌باشند.

استاندارد NFPA 54، الزامات لوله‌کشی، دریچه‌ها، جفت کردن روزنه ورودی سیستم لوله‌کشی با شیر تعویض سیستم پیل سوختی را فراهم می‌نماید. تانک‌های ذخیره بایوگازها و سایر تجهیزات مربوط به آن، لوله‌کشی‌ها، دریچه‌ها و تنظیم کننده‌ها باید مطابق با این استاندارد طراحی و نصب شوند.

استاندارد NFPA 52، الزامات طراحی، موقعیت و نصب لوله‌ها و جفت کردن روزنه خروجی سوخت با روزنه ورودی شیر تعویض تجهیزات را فراهم می‌نماید.

استاندارد NFPA 58، الزامات طراحی، موقعیت، نصب و ذخیره‌سازی و لوله‌کشی‌های Liquefied Petroleum Gas (LPG) را فراهم می‌سازد.

استاندارد NFPA 55 برای تطابق طراحی، موقعیت و نصب مخزن گاز هیدروژن با این استاندارد استفاده می‌شود.

استاندارد ASME/ANSI B31.3، الزامات لوله‌کشی هیدروژن، دریچه‌ها و جفت کردن مخزن هیدروژن با سیستم پیل سوختی را فراهم می‌نماید.

استاندارد NFPA 30، الزامات طراحی سیستم لوله‌کشی سوخت‌های مایع و محل آنها و ذخیره‌سازی آنها را فراهم نموده است. همچنین مکان‌هایی که احتمال آتش‌سوزی وجود دارد و یا ذخایر سوختی مایع قابل احتراق در آنجا می‌باشد باید دارای شیر آب آتش‌نشانی مطابق با استاندارد فوق باشند.

استاندارد NFPA 72: سیستم پیل سوختی طراحی شده بر طبق استاندارد مذکور باید مجهز به سیستم خودکار تشخیص آتش و زنگ خطر باشد.

استاندارد NFPA 70: تمامی ترانسفورماتورهای نصب شده باید مطابق با الزامات این استاندارد باشند.

فصل ۵

**گردآوری و بررسی استانداردهای
طراحی، تولید، نصب و راه‌اندازی و
تعمیر و نگهداری سیستم‌های پیل
سوختی**

۵-۱- استانداردهای بین المللی مربوط به پیل های سوختی

کدها و استانداردهای ذکر شده در جدول ۵-۱، راهنمای کلی مقررات مربوط به نصب پیل سوختی را ارائه می دهند. جزئیات بیشتر در مورد مفاد عنوان شده در جدول ۵-۲ ارائه شده است. جدول ۵-۲ به ۵ بخش اصلی که مربوط به سوخت مورد نیاز و سیستم پیل سوختی می باشد، به شرح زیر تقسیم بندی شده است [۲۹].

۱- تامین سوخت و ذخیره سازی آن

۲- جاگذاری سیستم پیل سوختی

۲-۱- کلیات

۲-۲- نصب در فضای باز (توسط دیوار و یا سقف محصور نگردیده است)

۲-۳- نصب در فضای محصور (درون ساختمان قرار گرفته باشد)

۳- اجزاء سیستم پیل سوختی

۴- حفاظت در برابر آتش

۵- برقراری اتصالات

۵-۱- تجهیزات قطع مدار جریان

۵-۲- روش های سیم کشی

۵-۳- اتصال به زمین

۵-۴- سیستم علامت گذاری و نشان دهنده

۵-۵- اتصال به مدارهای دیگر

۵-۶- خروجی جریان بیش از ۶۰۰ ولت

با استفاده از جدول ۵-۲ بازرسی اولیه از یک پیل سوختی می تواند انجام گیرد تا اطمینان حاصل شود که نصب سیستم براساس مقررات و کدها انجام گرفته باشد.

اطلاعات زیر در جدول ۵-۲ مورد استفاده قرار گرفته اند:

- انتشار - عنوان ارائه شده در کد/استاندارد را بیان می کند.
- الزامات - شرح مختصری از هر یک از مقررات کد را ارائه می کند.
- شرح مختصر - راهنمایی پرسنل اجرایی در رابطه با اینکه چه مسائلی را در ارتباط با نصب پیل سوختی مدنظر قرار دهند.

• کد/استاندارد - کد یا استاندارد مورد نیاز طراحی، نصب، مشخصات تجهیزات و یا عملیات نصب پیل سوختی ذکر شده است.

بر اساس جدول ۵-۱ و جدول ۵-۲، به طور کلی کدها و استانداردها در ارتباط با سیستم‌های پیل سوختی با کاربرد ساکن به صورت زیر عنوان می‌گردند:

۱- استاندارد NFPA 853 برای نصب سیستم پیل سوختی

۱-۱- پیکربندی کلی تجهیزات

۱-۲- نصب و برقراری ارتباطات مدار جریان برق

۱-۳- انواع ذخیره‌سازی و فراهم نمودن سوخت

۱-۴- تهویه و سیستم خروجی گاز

۱-۵- حفاظت در برابر آتش‌سوزی

۲- استاندارد NFPA 70, Article 692 برای نصب پیل‌های سوختی

۲-۱- احتیاجات مدار جریان

۲-۲- دستگاه‌های قطع کننده جریان

۲-۳- روش‌های کابل‌کشی

۲-۴- اتصال به زمین

۲-۵- علامت‌گذاری و نشانه‌ها

۲-۶- اتصال به دیگر مدارهای جریان

۳- استاندارد ANSI/CSA آمریکا FC 1-2004 برای طراحی/ساخت سیستم پیل سوختی

۳-۱- ساخت، کارایی و کنترل کیفیت

۳-۲- لیست نمودن آزمایشگاه تست شناخته شده در سطح ملی

۳-۳- تجهیزات کنترل ایمنی

۳-۴- سیستم قطع نمودن سیستم

۴- استاندارد IEEE P 1547 برای برقراری ارتباطات شبکه جریان

۵- استاندارد UL 1741 در ارتباط با شبکه توزیع جریان

جدول ۵-۱: کدها و استانداردهای مربوط به نصب پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن [۲۹]

موسسه	عنوان کد / استاندارد
ICC	2000 International Mechanical Code (IMC) وضع مقررات و کنترل بر طراحی، ساخت، نصب، کیفیت مواد مورد استفاده، مکان نصب، بهره‌برداری و نگهداری از سیستم‌های مکانیکی
ICC	2000 International Fuel Gas Code (IFGC) وضع مقررات و کنترل بر طراحی، ساخت، نصب، کیفیت مواد مورد استفاده، مکان نصب، بهره‌برداری و نگهداری از سیستم‌های مکانیکی
ICC	2000 International Fire Code (IFC) هدف IFC، تعیین حداقل الزامات مطابق با نتایج معقول بدست آمده از کارهای عملی در سطح ملی است برای ایجاد سطح معقولی از ایمنی و حفاظت در برابر خطرات آتش سوزی، انفجار و یا شرایط خطرناک در ساختمان‌ها، سازه‌های موجود و یا در حال احداث
ICC	2000 International Residential Code (IRC) حداقل شرایط لازم برای حفاظت در زندگی یا عضو از بدن و ایجاد سلامت و رفاه عمومی برای خانواده‌ها و جمعیت شهری
ICC	2000 International Building Code (IBC) حداقل شرایط لازم برای حفاظت از سلامت عمومی، ایمنی و رفاه عمومی از طریق استحکام ساختاری، در نظر گرفتن خروجی‌های اضطراری، بهداشت، نور مناسب و تهویه، حفظ انرژی، و ایمنی در برابر آتش و سایر خطرات محیطی
ICC	2000 International Plumbing Code (IPC) وضع مقررات و کنترل بر طراحی، ساخت، نصب، کیفیت مواد مورد استفاده، مکان نصب، بهره‌برداری و نگهداری و همچنین در استفاده از تجهیزات و سیستم‌های لوله کشی
NFPA	NFPA 70 (NFPA 70) 2002 National Electric Code سیستم‌های پیل سوختی - احتیاجات برای نصب سیستم‌های توان پیل سوختی که ممکن است مستقل یا تعاملی با سایر منابع تولید برق باشد و همچنین ممکن است همراه با ذخیره‌سازی انرژی مانند باتری یا بدون ذخیره‌سازی باشد.
NFPA	NFPA 50A / 50B NFPA 50A – Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites اصول کلی پیشنهاد شده برای نصب سیستم‌های هیدروژن گازی را در مکان‌های مصرفی پوشش می‌دهد که در آن هیدروژن به محل مصرف کننده با استفاده از تجهیزات حمل و نقلی انتقال می‌یابد. NFPA 50B – Standard for Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sites اصول کلی پیشنهاد شده برای نصب سیستم‌های هیدروژن مایع را در مکان‌های مصرفی پوشش می‌دهد که در آن هیدروژن به محل مصرف کننده با استفاده از تجهیزات حمل و نقلی انتقال می‌یابد.
NFPA	NFPA 54 - National Fuel Gas Code Natural Gas Systems قابل کاربرد برای نصب سیستم‌های لوله‌کشی گاز سوختی، تجهیزات بکارگیری از سوخت گازی و لوازم جانبی مرتبط
NFPA	NFPA 58 - Liquefied Petroleum Gas Code LPG (Liquefied Petroleum Gas) قابل کاربرد برای سیستم حمل و نقل گاز مایع شده و همچنین برای طراحی، ساخت، نصب و بهره‌برداری از سیستم‌های گاز مایع شده
NFPA	NFPA 853-2000 (NFPA 853) Standard for the Installation of Stationary Fuel Cell Power Plants

عنوان کد / استاندارد	موسسه
قابل کاربرد برای طراحی و نصب (۱) یک واحد تولید توان مستقل؛ (۲) ترکیبی از واحدهای تولید توان مستقل؛ (۳) واحدهای تولید توان شامل دو یا چند جزء مدولار قابل مونتاژ در محل نصب	
AMSE Boiler and Pressure Vessel Code	ASME
کد بین‌المللی بویلر و مخزن تحت فشار قوانین ایمنی را برای طراحی، ساخت و بازرسی دیگ‌های بخار و مخازن تحت فشار و اجزاء نیروگاه هسته‌ای در طول ساخت و ساز تعیین می‌کند.	
UL 1741 (UL 1741) Standards for Inverters Converters and Controllers for Use in Independent Power Systems, January 2001	UL
شامل متناوب‌سازها، تبدیل‌کننده‌های جریان، کنترل‌کننده‌های شارژ و کنترل‌کننده‌های خروجی در نظر گرفته شده برای استفاده در سیستم‌های توان مستقل (بدون شبکه) و یا تعاملی مبتنی بر شبکه (شبکه). اینورترها یا متناوب‌سازها و تبدیل‌کننده‌های جریان تعاملی کار به صورت موازی با سیستم تامین برق یا یک تجهیز الکتریکی برای تامین بارهای معمول مورد نیاز نصب می‌شوند.	
ANSI Z 21.83-1998 (ANSI Z 21.83) Standard on Stationary Fuel Cell Power Plants	CSA
الزامات حفاظت از آتش را برای حفاظت از زندگی و اموال فیزیکی مربوط به ساختمان‌ها یا تاسیساتی که از پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن استفاده می‌کنند، فراهم می‌کند.	
ICC - International Code Council, 5203 Leesburg Pike, Suite 600, Falls Church, VA 22041, (703) 931-4533, www.iccsafe.org NFPA - National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA 02269-9101, (800) 344-3555, www.nfpa.org ASME - ASME International, Three Park Avenue, New York, NY 10016, 1-800-843-2763, or 1-973-882-1167, Fax: 1-973-882-1717 UL - Underwriters Laboratories Inc., 333 Pfingsten Road, Northbrook, IL 60062-2096, Tim Zgonena, (847) 272-8800 Ext. 43051, timothy.p.zgonena@us.ul.com CSA - CSA International, Steven E Kazubski, Project Manager, Standards, 8501 E. Pleasant Valley Road, Cleveland, OH 441310-5575, (216) 524-4990 Ext. 8303, http://www.cas-international.org	

جدول ۲-۵: کدها و استانداردهای تاسیسات پیل سوختی [۲۹]

انتشار	الزامات	شرح مختصر	کد/استاندارد
تأمین سوخت و ذخیره‌سازی آن			
سوخت گاز طبیعی	شامل لوله، قطعات و اتصالات از نقطه تحویل به مخزن ذخیره سوخت ورودی پیل سوختی	گاز طبیعی در تطابق با NFPA 54 یا IFGC گاز طبیعی فشرده شده در تطابق با NFPA 52 و IFC	NFPA 853 – §4-2
سیستم‌های نفت گاز مایع (LPG)	شامل قطعات و اتصالات لوله‌کشی از سیستم ذخیره‌سازی LP Gas تا منبع ذخیره سوخت ورودی به پیل سوختی	LP Gas مطابق با NFPA 58 یا IFGC	NFPA 853-§4-3
سیستم‌های سوخت هیدروژنی	شامل قطعات و اتصالات لوله‌کشی از منبع ذخیره‌سازی هیدروژن گازی یا مایع تا منبع ذخیره سوخت ورودی به پیل سوختی	IBC و NFPA 50A (گازی) یا 50B (مایع) که در آن H ₂ در محلی خارج از سایت تولید می‌شود و توسط تجهیزات حمل و نقلی برای پیل‌های سوختی تأمین	NFPA 853 – §4-4

	می گردد. لوله، شیرآلات و اتصالات مطابق با ASTM/ANSI B31.3 یا IBC و IFGC 2003 برای نصب تمام سیستم های هیدروژنی گاز یا مایع بایستی تامین گردند.		
NFPA 853-§4-5	مخازن ذخیره سوخت بیوگاز و تجهیزات مربوطه مطابق با NFPA 54 یا IFGC	شامل قطعات و اتصالات لوله کشی از ذخیره سازی بیوگاز تا منبع ذخیره سوخت ورودی به پیل سوختی	سوخت بیوگاز شامل گازهای دفن زباله، گازهای بی هوازی و دیگر گازهای حاصل از تجزیه مواد آلی
NFPA 853-§4-6	سوخت مایع قابل اشتعال مطابق با IFC و NFPA 30، کد مایعات قابل اشتعال و قابل احتراق	شامل اجزاء و اتصالات لوله کشی از ذخیره مایعات قابل اشتعال یا قابل احتراق تا منبع ذخیره سوخت ورودی به پیل سوختی	سوخت های مایع (دیزل، JP-4، JP-5، اتانول، نفتا، متانول)
IMC §307 IPC §301.3, Appendix C	ارزیابی بر اساس طبقه بندی محصولات جانبی مایع	تعیین الزامات لازم برای دفع مایعات از تجهیزات، تنظیم مقررات لازم برای سیستم های بازیافت آب	دفع مایعات سیستم های بازیافت آب
ASME BPVC IMC §1001, §1003 IFC Chapter 32	ارزیابی تاسیسات پیل سوختی در استفاده از مخازن تحت فشار یا لوله های با فشار بالا	تعیین قوانین ایمنی در طراحی، ساخت و بازرسی دیگ های بخار و مخازن تحت فشار و اجزاء نیروگاه هسته ای در طول ساخت	کد بویلر و مخازن تحت فشار، بخش VIII، مخازن تحت فشار
ASME B31.3	برای نصب پیل های سوختی که براساس ANSI Z21.83 آزمایش نشده اند، ارزیابی مطابق با این کد برای لوله های مربوط به تمام مایعات، گازها، بخار آب، هوا و آب، جامدات معلق و سیالات مبرد به کار برده می شود.	الزامات برای مواد و اجزاء سیستم، طراحی، ساخت، مونتاژ، نصب، بررسی، بازرسی و تست لوله کشی	سیستم لوله کشی
IFC Chapter 35	پیل های سوختی از گازهای غنی از هیدروژن استفاده می کنند که از ریفورمینگ LPG یا گاز طبیعی حاصل می شود. گاز حاصل به طور مستقیم به پیل سوختی منتقل می گردد. لوله کشی انتقال هیدروژن یا گاز غنی از هیدروژن در یک سیستم بسته مطابق با بند IBC §307.9 در نظر گرفته شده است. سیستم های هیدروژن گازی نیز باید با NFPA 50A مطابقت داشته باشد.	مقررات مربوط به ذخیره سازی و استفاده از گازهای فشرده قابل اشتعال مانند اتان، اتیلن، متان و دیگر موارد. اما برای پیل های سوختی به طور ویژه هیدروژن باید مدنظر قرار گیرد.	گازهای قابل اشتعال
IMC §510	سیستم های خروجی خطرناک به طور کلی برای پیل های سوختی که گازهای حاصل توسط کانال هایی خارج می شوند یا پیل های سوختی طراحی شده و نصب شده	طراحی و ساخت سیستم های انتقال برای خروجی های خطرناک و تعیین الزامات مورد نیاز	سیستم های خروجی خطرناک

	مطابق با دستورالعمل‌های سازنده یا NFPA 853، مورد نیاز نیست. پیل‌های سوختی که درون ساختمان نصب شده‌اند و معیارهای فوق را برآورده نمی‌کنند باید تهویه و رقیق‌سازی توسط هوا در مقادیر کافی شوند که بتوانند به طور مستقیم به محیط اطراف پیل سوختی وارد گردند.		
IFC Chapter 38	بررسی الزامات فصل ذکر شده چراکه به خطرات مرتبط با ذخیره‌سازی و استفاده از LPG مربوط می‌شود. IFC به NFPA 58 برای استفاده از LPG ارجاع داده است. این استاندارد توسط NFPA 59 تکمیل شده که به طور خاص در مورد استفاده از LPG در تاسیسات گازی کاربرد دارد.	الزامات لازم برای نگهداری، بارگیری و استفاده از LPG	گازهای نفت مایع (LPG)
کلیات نصب پیل سوختی			
NFPA 853 – §3-1 IBC §1609, §1612, §1621, §1805 IFC §304, §305, §312, §2704 IMC §102.3, §303.4, §303.6, §306, §401.5, §501.3	ارزیابی الزامات بخش‌ها به شرح زیر است: ۱. پیل سوختی دارای یک پایه ثابت است که تجهیزات بر روی آن قرار گرفته‌اند. در غیر اینصورت به صورت متحرک می‌تواند قرار گیرد. پیل سوختی در خارج از محیط بالقوه خطرناک قرار دارد (NFPA 70 و NFPA 496). مکان‌هایی که پیل‌های سوختی نصب می‌شوند، در کلاس I، بخش ۲، به عنوان مکان‌های خطرناک طبقه‌بندی می‌شوند. به طور کلی، این بخش‌ها برای پیل‌های سوختی با کانال مناسب برای گازهای خروجی و یا پیل‌هایی که مطابق با دستورالعمل‌های سازنده و یا کد NFPA 853 طراحی و ساخته شده‌اند، کاربردی نمی‌باشد. دریچه‌های خروجی به گونه‌ای هستند که از درب‌ها، پنجره‌ها، ورودی‌های هوا و یا دیگر ورودی‌های ساختمان مجزا هستند که دوباره به درون ساختمان منتقل نشوند. دسترسی به کانال‌های خروجی باید برای تعمیرات و نگهداری وجود داشته باشد. پیل سوختی باید از مواد خطرناک یا قابل احتراق دور باشد. چند واحد توان در کنار یکدیگر باید به گونه‌ای باشند که آتش‌سوزی و یا ایجاد اشکال در یک واحد بر روی دیگر واحدها تاثیرگذار نباشد.	نصب پیل‌های سوختی و تجهیزات مرتبط با آن در رابطه با پایداری ساختاری، حفاظت، مجاورت با محیط‌های بالقوه خطرناک، تعمیر و نگهداری، آسیب‌های فیزیکی ناشی از ضربه و یا خرابکاری	کلیات نصب

نصب در محیط بیرون از ساختمان			
NFPA 853 – §3-2 NFPA 70-2002- §500 IBC §307.1, T307.7(1); IFC §304, §305, Chapter 27, §2704 IMC §303.6, §401.5 §401.6, §501.3, §701.5, §710	الزامات این بخش‌ها به صورت زیر ارزیابی می‌گردند: ۱. تایید طراحی و نصب واحد توان برای بکارگیری در فضای باز ۲. تعیین محدوده گازهای خروجی و ورودی‌های پیل سوختی که حداقل در فاصله ۱۵ فوتی از یکدیگر قرار گیرند که گاز خروجی دوباره از ورودی‌ها وارد نگردد و حداقل ۱۰ فوت از دیگر خطوط یا ساختمان‌های دیگر فاصله داشته باشد. ۳. حصول اطمینان از اینکه مقررات ماده ۵۰۰ استاندارد NFPA 70 برای برق، تجهیزات الکتریکی و سیم کشی نصب شده در مکان‌هایی با خطر بالقوه آتش‌سوزی یا انفجار رعایت شده باشد ۴. تایید نمودن اینکه جریان هوای ورودی به پیل سوختی به علت نزدیکی به حصارها، محوطه‌ها و غیره تحت تاثیر قرار نگرفته باشد. پیل سوختی باید از منابع احتراقی، محوطه‌های گرم و منابع ذخیره قابل احتراق، قابل اشتعال یا مواد خطرناک دور نگه داشته شود.	تعیین مقررات و الزامات برای تاسیسات پیل‌های سوختی در محیط باز از جمله سیستم‌های آگزوز مرتبط است.	نصب در محیط بیرون از ساختمان
NFPA 853 – §3-4 IBC §703.4, §1505	ارزیابی انطباق با NFPA 853 - §3-2 ارزیابی مواد عایق کاری پشت بام از جمله اینکه آنها غیرقابل اشتعال باشند یا در غیر این صورت با داشتن طبقه‌بندی آتش کلاس A، مورد تایید باشند.	فراهم نمودن احتیاجات برای نصب بر روی پشت بام	تاسیسات پشت بام
نصب در محیط بسته و داخل ساختمان			
NFPA 853 – §3-3 IMC §105, §924 IBC §302.1.1, §706, §714	ارزیابی الزامات بخش‌های ذکر شده به صورت زیر: ۱. حصول اطمینان از اینکه پیل سوختی مطابق با ANSI Z21.83 تست شده و بر اساس دستورالعمل نصب و راه‌اندازی سازنده نصب شده است، یا جایی که در آن نمی‌توان نشان داد که پیل سوختی مورد تست قرار گرفته یا بر اساس دستورالعمل سازنده نصب شده است (براساس توضیحات بالا)، باید یک کد رسمی برای تصدیق دستگاه ارائه شود. ۲. مکان‌های مورد استفاده در واحدهای مسکونی، اتاق‌ها یا فضاهایی که در مجاورت محل نصب پیل‌های سوختی می‌باشند، باید از موانع آتش‌سوزی استفاده شود که توانایی تحمل یک ساعت آتش‌سوزی را داشته باشند.	فراهم نمودن احتیاجات برای نصب پیل‌های سوختی در محیط بسته و ساختمان مقررات نصب دستگاه برای آزمایش و نصب پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن با قدرت خروجی بیش از ۱۰۰۰ کیلو وات	نصب در محیط بسته واحدهای توان پیل سوختی با کاربرد ساکن

Chapter 5 NFPA 853 – IMC §401.3, §501.4, §510	به جز واحدهای توان بدون سیستم خروجی گاز آزمایش شده با ANSI Z21.83، پیل‌های سوختی باید آب‌بندی شده و سیستم خروجی گاز داده باشند در غیر این صورت با کنترل‌کننده‌هایی باید تجهیز شوند تا ترکیب قابل اشتعال حاصل نگردد (برای مشاهده شرایطی که نیاز به نصب یک سیستم خروجی گازهای خطرناک می‌باشد به IMC §510.2 مراجعه گردد).	الزامات موردنیاز در ارتباط با سیستم تهویه، کانال‌های خروجی و هوای موردنیاز را برای نصب پیل سوختی فراهم می‌کند. کشورهای مورد نیاز برای فشارهای برابر و منفی و شرایطی که نیاز به نصب یک سیستم اگزوز خطرناک را در نظر می‌گیرد.	تهویه و کانال خروجی
NFPA 853 – §5-1 IMC §501.4, §510.3, IFC §2210.7.1	اتاق‌ها یا فضاهای دربرگیرنده پیل‌های سوختی دارای سیستم‌های خروجی گاز باید با هوای تازه تغذیه شوند تا جایگزین هوای مصرف شده شوند. چنین فضایی باید در فشار منفی یا برابر فشار محیط باقی بماند. کنترل‌های الکترومکانیکی برای عملیات هم‌زمان سیستم تهویه، سیستم خروجی گاز و سیستم ورود هوای تازه در هنگامی که پیل سوختی از کار می‌افتد، موردنیاز هستند. چنین سیستم‌های کنترلی تا زمان خاموش شدن کامل سیستم تولید توان پیل سوختی و پالایش کردن خط لوله‌ها فعال خواهند بود.	الزامات موردنیاز در ارتباط با سیستم تهویه، کانال‌های خروجی و هوای موردنیاز را برای نصب پیل سوختی فراهم می‌کند.	کلیات
NFPA 853 – Chapter 6	تایید نصب در صورتی موردنیاز باشد	مقررات ایمنی برای نصب پیل سوختی را ایجاد می‌کند. این مقررات جهت خاموش نمودن آتش پس از آتش‌سوزی وضع شده است.	حفاظت از آتش سوزی
NFPA 853 – §6-1.6 IMC §502.4.1 IFC §2210.7.1	اطمینان از اینکه سیستم خاموش کننده آتش برای اتاق یا فضایی که در آن پیل سوختی و اجزاء مرتبط قرار گرفته‌اند، در نظر گرفته شده باشد. تایید نصب سیستم تشخیص گاز قابل اشتعال برای همه کمپرسورهای گاز در فضای محصور و در محوطه واحد تولید توان، سیستم کانال خروجی یا اتاقی که پیل سوختی در آن قرار گرفته است. سیستم تشخیص باید معیارهای زیر را داشته باشد. ۱. باید تنظیم شود که در ۲۵ درصد از حد پایین قابل اشتعال (LFL) هشدار دهد. ۲. باید در ۶۰ درصد از LFL سیستم تولید توان را خاموش نماید. LFL باید حد پایین قابل اشتعال برای یک گاز یا مخلوطی از گازها باشد.	مقررات ایمنی برای نصب پیل سوختی را ایجاد می‌کند. این مقررات جهت خاموش نمودن آتش پس از آتش‌سوزی وضع شده است.	موقعیت‌های داخل ساختمان

	در جایی که هیدروژن گازی یا مایع شده به طور مستقیم به خط لوله وارد می گردد و به پیل سوختی تزریق می شود، تایید نصب یک سیستم تشخیص گاز قابل اشتعال که اطمینان بالایی دارد و به طور پیوسته میزان گاز قابل اشتعال را نشان می دهد، لازم می باشد. سیستم تشخیص باید معیارهای زیر را داشته باشد: ۱. تنظیم شده برای هشدار دادن در ۲۵ درصد از حد پایین قابل اشتعال (LFL) ۲. خاموش نمودن سیستم پیل سوختی در زمانی که میزان گاز قابل اشتعال به ۶۰ درصد LFL می رسد.		
NFPA 853 – §5-4 IMC §501.4 (see also 2003 IFGC, Chapter 7, and 2003 IFC § 2210.8)	مخازن تحت فشار و لوله ها با بکارگیری گازهای پاکسازی کننده از گاز قابل احتراق خالی می شوند و این گازها باید به نقطه ای خارج از ساختمان که ایجاد صدا نداشته باشند و نتوانند دوباره وارد ساختمان شوند، منتقل گردند. باید اطمینان حاصل گردد که دریچه ورودی از ورود آب یا اشیاء خارجی محافظت می شود.	احتیاجات لازم را برای پاکسازی و پالایش و همچنین تهویه سیستم پیل سوختی در زمان راه اندازی و خاموش نمودن سیستم فراهم می کند.	فرآیند پاکسازی و پالایش و تهویه
اجزاء پیل سوختی			
IMC §105, §924 NFPA 853 – §2.1 NFPA 853 – §2.2 NFPA 70 – §692.4, §692.6	حصول اطمینان از اینکه پیل سوختی مطابق با ANSI Z21.83 تست شده و براساس دستورالعمل نصب و راه اندازی سازنده نصب شده است، یا جایی که در آن نمی توان نشان داد که پیل سوختی مورد تست قرار گرفته یا براساس دستورالعمل سازنده نصب شده است (براساس توضیحات بالا)، باید یک کد رسمی برای تصدیق دستگاه ارائه شود.	مقررات نصب پیل های سوختی تا توان ۱۰۰۰ کیلو وات برای کاربردهای خانگی در ارتباط با نصب و تست نمودن آنها در رابطه مجوز استفاده از سیستم پیل سوختی برای تامین برق یک ساختمان می باشد پیل سوختی برای ارزیابی کاربردهای موردنظر خانگی مورد بررسی قرار می گیرد.	واحدهای تولید توان پیل سوختی با کاربرد ساکن (واحدهای از پیش آماده شده) الزامات نصب
NFPA 853 – §2.3	مراجع رسمی باید داده و اطلاعات مناسب را برای کمک به ارزیابی انطباق داشته باشند. مستندات شامل یک ارزیابی خطر آتش سوزی باشد که توسط یک فرد با سابقه و حرفه ای تهیه شده باشد.	مستندات و مدارک مهندسی برای سیستم های تولید توان پیل سوختی نصب شده در محل مورد نیاز می باشد	واحدهای تولید توان نصب شده در محل سایت
حفاظت در برابر آتش سوزی			
NFPA 853 – §6-1 IBC §907	برای پیل های سوختی نصب شده در فضای باز که فاقد منابع ذخیره سوخت مایع قابل اشتعال و احتراق هستند، تایید بر اینکه شیر آتش نشانی شهری یا شیر آب در	فراهم نمودن الزامات برای قرار دادن شیر آتش نشانی علاوه بر سیستم های تشخیص و هشدار برای تاسیسات پیل سوختی	تشخیص و حفاظت در برابر آتش سوزی

	محوطه فراهم شده است. ارزیابی خطر آتش‌سوزی برای تمام واحدهای توان پیل سوختی مورد نیاز است. ای که حصول اطمینان از اینکه اتاق‌ها یا فضاهای بسته اند با یک سیستم پیل‌های سوختی در آنها قرار گرفته تشخیص آتش‌نشانی اتوماتیک تجهیز شده باشند.		
NFPA 853 – §6-2 IFC Chapter 4	گزارش موارد اضطراری، هماهنگی با نیروهای واکنش اضطراری، برنامه‌های اورژانسی و روش‌های مدیریت یا مقابله با شرایط اضطراری باید مطابق مقررات این فصل باشد.	نیاز به مکتوب نمودن برنامه‌ریزی اضطراری و جلوگیری از آتش‌سوزی براساس اندازه و موقعیت واحد تولید توان پیل سوختی	پیشگیری از آتش‌سوزی و برنامه‌ریزی اضطراری
برقراری اتصالات			
IMC §924	حصول اطمینان از اینکه پیل سوختی با کاربرد ساکن براساس دستورالعمل‌های نصب و راه اندازی سازنده باشد و تایید این مطلب که نصب مطابق با این دستورالعمل انجام گرفته باشد	نیاز است که پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن با قدرت خروجی بیش از ۱۰۰۰kW، مطابق دستورالعمل نصب و راه‌اندازی تولیدکننده نصب گردد	واحدهای تولید توان پیل سوختی با کاربرد ساکن
NFPA 853 – §3-5 NFPA 70 – §692 IFGC	برای ارتباطات برق و سیم‌کشی، ارزیابی انطباق باید مطابق با NFPA 70 باشد. برای ارزیابی سیستم‌های لوله کشی گاز و اتصالات باید مطابق با NFPA 54 یا IFGC ارزیابی انجام گیرد.	فراهم نمودن احتیاجات برای برقراری اتصال سیستم پیل سوختی با دیگر سیستم‌های ساختمان	برقراری اتصالات با دیگر سیستم‌های ساختمان
UL 1741	بررسی اینکه اینورتر، مبدل جریان، کنترل‌کننده‌های شارژر و کنترل‌کننده‌های خروجی مطابق با UL 1741 تست شده، گواهی شده و برچسب گذاری شده‌اند.	فراهم نمودن الزامات برای مبدل‌های جریان، کنترل‌کننده‌های شارژ و کنترل‌کننده‌های جریان خروجی برای استفاده در سیستم‌های تولید توان مستقل و یا تعاملی	مبدل‌های جریان و کنترل‌کننده‌ها برای استفاده در سیستم‌های تولید توان مستقل
IEEE P1547	اتصال شبکه برای پیل‌های سوختی باید مطابق با استاندارد کمیته هماهنگی استانداردهای IEEE 21 باشد.	استاندارد یکپارچه‌ای را برای اتصال منابع توزیع شده با سیستم‌های تولید برق فراهم می‌کند. این الزامات مربوط به عملکرد، عملیات، آزمایش، ملاحظات ایمنی و تعمیر و نگهداری اتصال است	استاندارد اتصال منابع توزیع جریان و سیستم‌های تولید برق - تعیین معیارها و الزامات برای اتصال منابع توزیع شده ^۱ (DR) با سیستم‌های تولید برق ^۲ (EPS).
NFPA 70 – §692.8	ارزیابی اینکه آیا مدارهای جریان مطابق با ظرفیت‌شان در برابر جریان بیش از حد محافظت شده‌اند. جریان خروجی	الزامات مورد نیاز برای اندازه‌گیری مدار، جریان و آمپر برای یک سیستم پیل سوختی	مقیاس مدار و جریان

^۱ Distributed Resources^۲ Electric Power Systems

	پیل سوختی به علاوه حداکثر جریان بار متعادل نشده نباید از ظرفیت هادی‌های زمینی یا خنثی تجاوز کند.		
NFPA 70 – § 692.9	اگر سیستم تولید توان به منابع برق مختلف وصل شده باشد، نیاز به حفاظت در برابر جریان بیش از حد ضروری است.	سیستم پیل‌های سوختی را در برابر جریان بیش از حد مدار حفاظت می‌کند. در پیل سوختی سیستم حفاظت از جریان بیش از حد بایستی تامین شود.	حفاظت در برابر افزایش بیش از حد جریان
NFPA 70 – § 692.10	تایید وجود یا عدم وجود مشخصه‌ها برای سیستم‌های پیل سوخت مستقل.	اجازه می‌دهد تا سیستم‌های پیل سوختی مستقل برای تامین قدرت AC ساختمان مورد استفاده قرار گیرند و توان ۱۲۰ ولت برق را برای تجهیزات و پانل‌های توزیع فراهم نماید	سیستم‌های مستقل
NFPA 70 – § 692.13	تاییدیه برای دستگاه قطع جریان ارائه شده است.	نیاز به وسیله‌ای برای قطع کردن تمام مدارهای جریان الکتریکی یک سیستم پیل سوختی از ساختمان یا یک ساختار.	مدارهای جریان
NFPA 70 – § 692.14	این مقررات درجایی که بیش از یک ساختمان تحت مدیریت مشترک هستند قابل استفاده می‌باشد. در این رابطه، چنین مقرراتی در زمان جریان بیش از حد، برای قطع ارتباط استفاده می‌شوند.	مراجع NFPA 70 ۲۲۵/۳۱ و ۲۲۵/۳۳ تا ۲۲۵/۴۰ برای قطع اتصال پیل سوختی	مقررات
NFPA 70 – § 692.17	ارزیابی وجود یا عدم وجود مشخصه‌هایی برای سوئیچ یا قطع کننده مدار	مقرراتی را در رابطه با نوع سوئیچ‌هایی که برای قطع کردن مدارهای زیر زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بیان می‌کند.	سوئیچ یا قطع کننده مدار
NFPA 70 – § 692.31	ارزیابی روش‌های سیم‌کشی و مواد مورد استفاده بر اساس فصل ۳	مرجع NFPA 70، فصل ۳ برای روش‌های کابل‌کشی	سیستم‌های کابل‌کشی
NFPA 70 – § 692.41	ارزیابی روش‌های اتصال به زمین برای سیستم‌های پیل سوختی	فراهم نمودن الزامات اتصال به زمین برای سیستم‌های پیل سوختی.	اتصال به زمین
NFPA 70 – § 692.44 NFPA 70 – § 692.45 NFPA 70 – § 692.47	تصدیق اینکه که یک مدار تخلیه جریان به زمین جداگانه نصب شده است.	نیاز به نصب یک مدار اتصال به زمین جداگانه	تجهیزات اتصال به زمین
NFPA 70 – § 692.53	ارزیابی علائم و نشانه‌ها در سیستم پیل سوختی	نیاز به علائم و نشان‌ها برای سیستم‌های توان پیل سوختی	نصب علائم و نشانه برای سرویس‌های توان پیل سوختی
NFPA 70 – § 692.54 IMC §301.3, §1307 IFGC §409	تایید موقعیت شیر قطع کننده جریان که به عنوان وسیله قطع کننده جریان به ساختمان فراهم می‌گردد.	تعیین موقعیت‌های مناسب برای شیرهای دستی قطع کننده جریان به سیستم پیل سوختی	علائم در ارتباط با: - قطع جریان سوخت - شیرهای جریان سوخت مابع

			- شیرهای قطع کننده جریان
NFPA 70 - §692.56	ارزیابی محل نشانه‌های مورد نیاز	نیاز به نشانه‌هایی برای سیستم‌های پیل سوختی که انرژی الکتریکی را ذخیره می‌کنند.	نشانه‌های برای انرژی ذخیره شده
NFPA 70 - §692.59 NFPA 70 - §230, Part V	برای پیل‌های سوختی، نصب یک سوئیچ مورد تایید (به صورت داخلی یا خارجی)، مورد بررسی قرار می‌گیرد.	نیاز به سوئیچ انتقال در سیستم‌های غیر تعاملی که از یک شبکه پشتیبان استفاده می‌شود	سوئیچ انتقال (در اتصال به دیگر مدارهای جریان)
NFPA 70 - §692.60 IEEE P1547	بررسی محدودیت‌های استفاده مشخص شده توسط سازنده. اتصال شبکه برای پیل‌های سوختی می‌تواند مطابق با IEEE P1547 که برای تست کردن و تایید کاربرد دارد، انجام گیرد.	سیستم‌های پیل سوختی در تعامل با یکدیگر لازم است که در سیستم‌های تعاملی تعریف گردند	تجهیزات تعاملی (در اتصال به دیگر مدارهای جریان)
NFPA 70 - §692.61 IEEE P1547	تایید سازگاری با دیگر سیستم‌های موازی	خروجی جریان سیستم‌های پیل سوختی که به صورت موازی عمل می‌کنند باید با دیگر سیستم‌های الکتریکی موازی سازگار باشد	مشخصه‌های خروجی (در اتصال به دیگر مدارهای جریان)
NFPA 70 - §692.62 IEEE P1547	تایید اینکه سیستم تشخیص برای سیستم وجود دارد.	سیستم پیل سوختی نیازمند وسیله‌ای برای تشخیص زمانی است که شبکه تولید برق و توزیع انرژی توان خود را از دست می‌دهد.	از دست رفتن توان در سیستم‌های تعاملی
NFPA 70 - §692.64 IEEE P1547	ارزیابی سیستم اتصال جریان	فراهم نمودن احتیاجات موردنیاز برای اتصال سیستم‌های تک‌فاز به سیستم ۳ فاز	اتصالات جریان غیرمتوازن
NFPA 70 - §692.65	وسيله‌ای برای اتصال جریان به اختیار طراح / سازنده است.	فراهم نمودن احتیاجات برای اتصال خروجی جریان در سیستم‌های پیل سوختی	نقطه اتصال (در اتصال به دیگر مدارهای جریان)
NFPA 70	به کارگیری NFPA 70 برای خروجی بیش از ۶۰۰ ولت برای ارزیابی انطباق	مقررات مندرج در NFPA 70 برای سیستم‌های پیل سوختی با خروجی بیش از ۶۰۰ ولت AC	کلیات در ارتباط با خروجی‌های بالاتر از ۶۰۰ ولت

فصل ۶

جمع آوری و بازنگری اسناد

بالادستی و سندهای توسعه فناوری

پیل سوختی

تنها سندی که در در داخل کشور در رابطه با توسعه فناوری پیل سوختی تهیه شده است، سند راهبرد ملی توسعه فناوری پیل سوختی کشور است که در سال ۱۳۸۴، نهایی و در سال ۱۳۸۶، مورد تصویب هیئت دولت قرار گرفت. خلاصه این سند به شرح زیر می‌باشد.

۶-۱- سند راهبرد ملی و توسعه فناوری پیل سوختی کشور

به استناد بند نهم سیاست‌های کلی قانون برنامه چهارم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران و به پیشنهاد کمیته راهبری پیل سوختی، سندی به منظور توسعه نظام‌مند فناوری پیل سوختی در کشور ارائه شده است. این سند در سال ۱۳۸۶ مورد تصویب هیئت دولت قرار گرفت و به عنوان سند بالادستی برای کلیه برنامه‌های بخشی و فرابخشی این حوزه فناوری تلقی می‌شود.

در این سند اشاره شده است که فناوری پیل سوختی تاثیر شگرفی بر بازار جهانی انرژی و الگوی مصرف آن داشته باشد. از سوی دیگر، دستیابی به جایگاهی مناسب برای کشور در این فناوری به دلایل زیر امکان‌پذیر می‌باشد:

- وجود منابع عظیم گاز طبیعی که در حال حاضر یکی از مهمترین منابع استحصال هیدروژن بوده و همچنین قابلیت استفاده مستقیم در پیل سوختی را نیز دارد.
- برخورداری کشور از پتانسیل مناسب نیروی انسانی متخصص.
- وجود سابقه، تجربه و توان علمی در تبدیل و فرآوری سوخت‌های فسیلی.
- وجود زیرساخت‌های تولید و توزیع گاز طبیعی در کشور که بستر را برای به کارگیری فناوری پیل سوختی در سطح گسترده فراهم می‌آورد.
- وجود منابع مناسب انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر باد، خورشید و زمین گرمایی با قابلیت استحصال هیدروژن.
- جدید بودن فناوری و فاصله (شکاف) تکنولوژیک نه چندان زیاد کشور با کشورهای پیشرفته جهان.
- در دسترس بودن بازارهای بالقوه فناوری پیل سوختی در صنایع حمل و نقل و نیروگاه در دهه‌های آتی و ایجاد و توسعه بازارهای جدید مصرف گاز طبیعی.

چشم‌انداز این سند به شرح زیر می‌باشد:

با اتکال به خداوند متعال و در راستای تحقق چشم‌انداز بیست ساله کشور و با تلاش نظام‌مند ذی‌نفعان این فناوری در یک بازه ۱۵ ساله، جمهوری اسلامی ایران بر مبنای شاخص‌های بین‌المللی توسعه فناوری، جزء ۵ کشور توسعه یافته، توانمند و صاحب فناوری قاره آسیا و اولین کشور منطقه در زمینه طراحی، تولید، ارتقاء و به کارگیری فناوری پیل‌های سوختی راهبردی خواهد شد.

اهداف کلان در این سند به اختصار به شرح زیر می‌باشد:

- طراحی، تولید و ارتقای فناوری پیل‌های سوختی راهبردی در بازارهای رقابتی داخل و خارج از کشور با رعایت اولویت‌های بازار تقاضا؛
- بسط و توسعه سرمایه‌گذاری در صنعت تولید پیل‌های سوختی راهبردی و فناوری‌های کلیدی آن با تاکید بر نقش بخش خصوصی، تکیه بر مزیت‌های رقابتی، ایجاد اشتغال و رویکرد صادرات.
- ایجاد و گسترش ظرفیت‌های به کارگیری و بهره‌برداری از فناوری پیل‌های سوختی راهبردی در داخل و خارج از کشور با ایجاد و بهره‌گیری از سازوکارهایی نظیر احتساب هزینه‌های واقعی تولید انرژی، توسعه بازارهای ویژه در کشور و وضع قوانین موردنیاز.

سیاست‌های کلان

- حداکثر استفاده از توانمندی‌ها و قابلیت‌های داخلی به ویژه توانمندی‌های بخش خصوصی با تاکید بر نقش حمایتی دولت.
- تمرکز در سیاست‌گذاری با رویکرد ملی و فرابخشی و هماهنگی و نظام‌مندی در اجرا.
- تاکید بر همکاری، تعامل و مشارکت بین‌المللی در توسعه نظام‌مند فناوری پیل‌های سوختی راهبردی.
- هماهنگی با راهبردهای کلان و اقدامات بخش انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور.
- توسعه بهره‌گیری از پیل‌های سوختی در کشور و کاربردی کردن آن در بخش‌های اقتصادی و تولیدی.

۱-۱-۶- راهبردها

- توسعه فناوری پیل‌های سوختی راهبردی «غشا پلیمری تبادل یونی» و «اکسید جامد» و فناوری کلیدی آنها از طریق تحقیقات پایه، کاربردی و توسعه‌ای.
- توسعه فناوری‌های مربوط به مبدل‌های گازطبیعی به هیدروژن و ذخیره‌سازی هیدروژن.
- کمک به ایجاد و توسعه بازارهای داخلی و نفوذ در بازارهای بین‌المللی پیل سوختی با کاربرد حمل و نقل و تولید برق با شروع از بازارهای زود هنگام مولدهای خانگی با پیل سوختی غشاء پلیمری تبادل یونی.
- توسعه و تکمیل نظام ملی نوآوری پیل سوختی در کشور شامل محورهای زیر
 - ۱- توسعه منابع انسانی موردنیاز برای به کارگیری در فرآیند توسعه فناوری پیل‌های سوختی راهبردی.
 - ۲- هدایت و حمایت‌های مادی و معنوی از تحقیقات و نوآوری پیل‌های سوختی راهبردی.
 - ۳- آگاه‌سازی، ترویج و اطلاع‌رسانی عمومی در خصوص منافع و مزایای فناوری پیل سوختی.
 - ۴- تدوین استانداردها، تعیین معیارها و ضوابط فنی و کیفی و بسترهای حقوقی موردنیاز جهت تسهیل فرآیند نوآوری در فناوری پیل‌های سوختی راهبردی و فناوری‌های کلیدی آن.

- ۵- تعامل بین‌المللی، تشکیل و مشارکت در کنسرسیوم‌های توسعه فناوری پیل سوختی به منظور کاهش ریسک و هزینه‌های تحقیقاتی.
- ۶- هدایت و حمایت‌های مادی و معنوی برای شکل‌گیری و توسعه صنایع رقابت‌پذیر در زمینه فناوری پیل سوختی با تاکید بر نقش بخش خصوصی.
- ۷- تمهید و تسهیل منابع مالی موردنیاز توسعه فناوری پیل‌های سوختی راهبردی و فناوری‌های کلیدی آن.
- ۸- تنظیم قوانین و مقررات موردنیاز توسعه فناوری پیل‌های سوختی راهبردی و ظرفیت‌سازی به کارگیری آن در کشور.
- ۹- توسعه کاربردی کردن فناوری‌های پیل سوختی در صنایع حمل و نقل و صنایع مرتبط.
- ۱۰- تشویق و تقویت صادرات و بازاریابی خارجی.

۶-۱-۲- اقدامات

اقدامات، مجموعه‌ای از طرح‌ها و برنامه‌های اجرایی است که به تحقق راهبردها و دستیابی به اهداف کمک می‌نماید. این اقدامات شامل سه دوره زمانی کوتاه‌مدت (۱۳۹۰ - ۱۳۸۶)، میان‌مدت (۱۳۹۵ - ۱۳۹۱) و بلندمدت (۱۴۰۰ - ۱۳۹۶) بوده است. با توجه به چرخه عمر فناوری^۱ پیل سوختی و عدم وجود شرایط مناسب برای حضور موثر بخش خصوصی، عمده اقدامات کوتاه‌مدت و میان‌مدت بر عهده دولت بوده و در دوره بلند مدت با بسترسازی، تشویق و استفاده از سیاست‌های تحریک عرضه و تقاضا، تحقیقات توسعه‌ای و به کارگیری فناوری در صنعت به بخش خصوصی واگذار خواهد شد. ضمناً در صورت نیاز، هر یک از اقدامات می‌توانند در دوره‌های بعدی نیز تکرار شوند.

اقدامات کوتاه‌مدت

هدف دوره: سیاست‌گذاری^۲، انجام فعالیت‌های تحقیق و توسعه، آگاه‌سازی و ترویج فناوری.

- تاسیس ستاد توسعه پیل سوختی.
- تدوین و پیشنهاد قوانین و مقررات مربوط به حمایت از توسعه فناوری پیل سوختی در کشور.
- کمک به ایجاد تشکل‌های علمی، صنفی و غیردولتی^۳ حامی توسعه فناوری پیل سوختی.

^۱ . Technology cycle

^۲ . Policy making

^۳ . Non-Government Organizations (NGO)

- تاسیس و راه‌اندازی مرکز توسعه فناوری پیل سوختی با اخذ مجوزهای قانونی مرتبط.
- تاسیس صندوق حمایت از توسعه فناوری پیل سوختی به صورت مجزا با صندوق حمایت از بهره‌وری انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر با اخذ مجوزهای قانونی مربوط.
- تسلط بر فناوری طراحی و یکپارچه‌سازی سیستم پنج کیلوواتی پیل سوختی غشاء پلیمری تبادل یونی و تولید نمونه آن.
- تسلط بر فناوری طراحی و ساخت تک پیل و تولید نمونه کوچک توده پیل سوختی اکسید جامد.
- تسلط بر فناوری طراحی و ساخت مبدل گاز طبیعی به هیدروژن و تولید نمونه آن.
- تسلط بر فناوری طراحی و ساخت مخزن ذخیره هیدروژن و تولید نمونه آن.
- خرید، نصب و بهره‌برداری چند نمونه از سیستم‌های مختلف پیل سوختی.
- توسعه پایگاه اطلاع‌رسانی و انتشار بولتن خبری تحولات فناوری پیل سوختی در جهان و کشور.
- استمرار مطالعات راهبردی موردنیاز درخصوص فناوری پیل سوختی.
- تدوین برنامه‌های عملیاتی موردنیاز برای عملی نمودن اقدامات.
- تربیت و جذب نیروی انسانی متخصص موردنیاز اقدامات و برنامه‌های عملیاتی.
- برگزاری دوره‌های مشترک آموزشی با مراکز معتبر بین‌المللی.
- حمایت از پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد و دکتری مرتبط با پیل‌های سوختی راهبردی و فرآورش سوخت^۱.
- حمایت از دستاوردهای مبتکران و مخترعان فناوری پیل‌های سوختی راهبردی.
- مشارکت در کنفرانس‌های فناوری بین‌المللی.
- تولید نرم‌افزارهای طراحی و ساخت پیل‌های سوختی راهبردی و فناوری‌های کلیدی آنها.
- حمایت از پروژه‌های تحقیقاتی به منظور بهره‌گیری از پیل سوختی در صنایع نیروگاهی، حمل و نقل و کاربردهای صنعتی.

اقدامات میان‌مدت

- هدف دوره: ادامه فعالیت‌های تحقیق و توسعه، آگاه‌سازی و ترویج، ایجاد زیرساخت‌های لازم جهت توسعه فناوری.
- مطالعه و انتخاب سیستم بهینه فرآورش سوخت جهت استفاده در خودرو.

^۱ . Fuel processing

- طراحی و ساخت سیستم ده و بیست و پنج کیلوواتی پیل سوختی غشاء پلیمری تبادل یونی و تولید نمونه‌هایی که در کاربردهای مولدهای خانگی و حمل و نقل موردآزمایش قرار گیرند.
- تسلط بر فناوری طراحی و یکپارچه‌سازی سیستم پنج کیلوواتی پیل سوختی اکسید جامد و تولید نمونه آن.
- تدوین استاندارد تولید، توزیع و بهره‌برداری از هیدروژن و پیل سوختی با همکاری موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.
- راه‌اندازی مراکز رشد فناوری پیل سوختی.
- ایجاد ساز و کارهای حمایت از مالکیت معنوی^۱ نوآوری‌ها و اختراعات فناوری پیل سوختی با همکاری سازمان ثبت اسناد و املاک کشور.

اقدامات بلندمدت

- هدف دوره: ادامه فعالیت‌های تحقیق و توسعه، آگاه‌سازی و ترویج، شروع به کارگیری^۲ فناوری.
- تولید و به کارگیری سیستم ده کیلوواتی پیل سوختی غشاء پلیمری تبادل یونی در کاربرد مولدهای خانگی متناسب با حجم بازار هدف.
 - تولید و به کارگیری سیستم بیست و پنج کیلوواتی پیل سوختی غشاء پلیمری تبادل یونی در مصارف حمل و نقل عمومی و ویژه.
 - طراحی و ساخت سیستم پنج و ده کیلوواتی پیل سوختی اکسید جامد.
 - اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی و کاهش قیمت تمام‌شده پیل‌های سوختی راهبردی به منظور دستیابی به چشم‌انداز تعیین شده.
 - ایجاد سازوکارهای مختلف انگیزشی - حمایتی از بنگاه‌های اقتصادی تولیدکننده پیل سوختی و فناوری‌های کلیدی آن.
 - اعطای معافیت‌های مالیاتی برای بنگاه‌های اقتصادی تولیدکننده پیل‌های سوختی راهبردی و فناوری‌های کلیدی آن، با اخذ مجوزهای قانونی مربوط و رعایت دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های ذی‌ربط.
 - اعطای تسهیلات بانکی با شرایط مناسب جهت سرمایه‌گذاری موردنیاز برای اجرای طرح‌های توسعه‌ای فناوری پیل‌های سوختی راهبردی با رعایت قوانین و مقررات مربوطه.

^۱ . Intellectual property (IP)

^۲ . Deployment

- تدوین دستورالعمل خرید انرژی الکتریکی از واحدهای خصوصی تولیدکننده انرژی الکتریکی که از طریق پیل‌های سوختی راهبردی تولید انرژی می‌کنند.
- تامین نود مگاوات توان الکتریکی سیستم انرژی کشور به صورت غیرمتمرکز و با استفاده از نیروگاه‌های پیل سوختی تا سال ۱۴۰۰ هجری شمسی.
- تدوین مقررات استفاده از سیستم محرکه پیل سوختی در مصارف حمل و نقل.
- تولید و بهره‌برداری از صد دستگاه خودروی حمل و نقل عمومی در سطح کلان شهرهای کشور با استفاده از سیستم محرکه پیل سوختی، غشاء پلیمری تبادل یونی تا سال ۱۴۰۰ هجری شمسی.

۳-۱-۶- ترتیبات اجرایی

به منظور تحقق اهداف این سند، ترتیبات اجرایی مطابق نمودار و شرح ذیل خواهد بود:

- تاسیس ستاد توسعه پیل سوختی با ریاست معاون اول رئیس جمهور و با عضویت وزرای نیرو (دبیر ستاد)، صنایع و معادن، نفت، علوم، تحقیقات و فناوری، دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح، وزارت جهاد کشاورزی، مسکن و شهرسازی، روسای سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، سازمان حفاظت محیط زیست، دفتر همکاری‌های فناوری ریاست جمهوری و سازمان انرژی‌های نو ایران.
- تاسیس کمیته راهبری پیل سوختی زیر نظر ستاد توسعه پیل سوختی متشکل از معاونین ذی‌ربط اعضای ستاد به علاوه پژوهشکده مهندسی وزارت جهاد کشاورزی و دو نفر از خبرگان دانشگاه و صنعت با انتخاب ستاد توسعه پیل سوختی به منظور راهبری و نظارت بر اقدامات توسعه فناوری پیل سوختی و ایجاد و فعال‌سازی دبیرخانه ستاد توسعه پیل سوختی که در وزارت نیرو تشکیل می‌گردد.
- تاسیس مرکز توسعه فناوری پیل سوختی زیر نظر کمیته راهبری با مأموریت مدیریت فناوری و تحقیقات توسعه فناوری پیل سوختی و در صورت لزوم به تشخیص کمیته راهبری انجام بخش‌هایی خاص از تحقیقات و اقدامات مورد نیاز.
- کمیته راهبری مسئولیت نظارت و پیگیری اجرای دقیق و کامل مفاد این سند را به عهده دارد.
- اعتباراتی که از بودجه عمومی به امر توسعه پیل سوختی تخصیص می‌یابد در اختیار دستگاه اجرایی که متصدی تشکیل دبیرخانه ستاد می‌باشد، قرار می‌گیرد. پس از اخذ مجوزهای قانونی و در چارچوب سند راهبرد ملی توسعه فناوری پیل سوختی با رعایت قوانین و مقررات مربوطه مطابق با برنامه‌های تصویب شده در ستاد و یا کمیته راهبری هزینه خواهد شد.
- برنامه‌های عملیاتی و دستور کار جلسات ستاد و کمیته راهبری توسط دبیرخانه و با همکاری دستگاه‌های مرتبط تهیه و پس از تایید کمیته راهبری، جهت تصویب به ستاد توسعه پیل سوختی ارائه خواهد شد.

- کمیته راهبری، مسئولیت بررسی طرح‌ها و برنامه‌های بخشی و فرابخشی و نظارت بر اجرای صحیح اقدامات را بر عهده دارد.
- با توجه به روند سریع تحولات فناوری پیل سوختی و الزامات جدید جهانی، هر دو سال یکبار و در صورت تشخیص کمیته راهبری و تایید ستاد توسعه پیل سوختی سند حاضر مورد بازبینی و تجدیدنظر قرار می‌گیرد.

فصل ۷

**بررسی الزامات فنی در مورد
کاربردهای ساکن در داخل کشور**

۷-۱- استانداردهای ملی مرتبط با فن آوری پیل سوختی ثابت

موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به عنوان تنها مرجع رسمی کشور، تدوین استاندارد در رشته‌های مختلف در کمیسیون فنی مرکب از کارشناسان موسسه و صاحب‌نظران مراکز و موسسات علمی را برعهده دارد. در سال ۱۳۸۷ پیش‌نویس دو استاندارد مربوط به فن‌آوری‌های پیل‌های سوختی ثابت در کمیته ملی استاندارد برق و الکترونیک مورد تصویب قرار گرفتند و پس از آن به عنوان استانداردهای ملی شناخته شدند. البته لازم بذکر است که برای حفظ هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی این استانداردها در مواقع لزوم تحت تجدیدنظر قرار خواهند گرفت که البته تاکنون این استانداردها مورد بازبینی قرار نگرفتند. استانداردهای دیگری در زمینه پیل های سوختی قابل حمل و همچنین میکروپیل‌های سوختی تعریف شده است که در این بخش به آنها پرداخته نخواهد شد.

دو استاندارد مربوط به فن‌آوری‌های پیل‌های سوختی ثابت برای کاربردهای مختلف و با استفاده از انواع سوخت ها در دو بخش ایمنی و نصب تعیین شده‌اند که عبارتند از :

- ۱- " فن آوری پیل سوختی-قسمت ۳-۱-سیستم‌های قدرت پیل سوختی ثابت -ایمنی" با شماره استاندارد ۹۸۱۴-۳-۱ با هدف تعیین استاندارد ایمنی محصول برای ارزیابی انطباق مطابق راهنماهای IEC Guide 104:1997، ISO/IEC Guide 51: 1999 و ISO/IEC Guide 7:1994 است. این استاندارد برگرفته از استاندارد بین‌المللی IEC با مشخصات ذیل است:

IEC 62282-3-1: 2007, Fuel cells technologies- Part 3-1: Stationary fuel cells power systems-Safety

- ۲- "فن‌آوری پیل سوختی-قسمت ۳-۳-سیستم‌های قدرت پیل سوختی ثابت -نصب" با شماره استاندارد ۹۸۱۴-۳-۳ با هدف فراهم نمودن حداقل الزامات ایمنی برای نصب سیستم‌های پیل سوختی ساکن در فضای بسته و باز فن‌آوری پیل سوختی مطابق با استاندارد ۹۸۱۴-۳-۱ است. این استاندارد برگرفته از استاندارد بین‌المللی IEC با مشخصات ذیل است:

IEC 62282-3-3: 2007, Ed 1.0, Fuel cells technologies Part 3-3: Stationary fuel cells power systems-installation

فصل ۸

**بررسی محصولات قبلی ساخته شده
و قوانین ایجاد شده قبلی در حوزه
پیل سوختی در داخل کشور**

فعالیت‌های مختلفی از طرف کمیته راهبری پیل سوختی تعریف و اجرا گردید که به اختصار در جدول ۸-۱ آمده است.

جدول ۸-۱: پروژه‌های واگذار شده از طرف کمیته راهبری پیل سوختی

ردیف	عنوان	مجری	تاریخ
۱	احداث واحد پیلوت فناوری هیدروژن در مقیاس نیمه صنعتی	سانا (متن)	۱۳۷۵
۲	طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی پیل سوختی	شرکت تقطیران کاشان	۱۳۷۸
۳	پیل سوختی در مرکز تحقیقات ایران خودرو	شرکت ایران خودرو	۱۳۷۸
۴	ساخت کیت‌های آموزشی و نمونه پیل سوختی	شرکت فناوری برتر هزاره سوم هیدروژن	۱۳۷۹
۵	طراحی و ساخت پیل سوختی ۱ کیلووات	شرکت تقطیران کاشان	۱۳۷۹
۶	پیک سایی نیروگاه های متعارف کشور بوسیله پیل سوختی	سانا	۱۳۸۳
۷	احداث پیلوت مستقل از شبکه بر پایه هیدروژن خورشیدی و پیل سوختی	سانا	۱۳۸۴
۸	تامین، نصب و راه اندازی یک سیستم سوختی ۲۵ کیلووات و تجهیزات جانبی آن	سانا	۱۳۸۶
۹	طراحی و ساخت پیل سوختی ۵ کیلووات با هدف تدوین دانش فنی	مرکز تحقیقات جهاد دانشگاهی اصفهان	۱۳۸۶
۱۰	طراحی و ساخت تک سل پیل سوختی اکسید جامد	پژوهشگاه نیرو	۱۳۸۷
۱۱	طراحی کنترل خودکار سیستم پیل سوختی پلیمری ۵ کیلووات	مرکز تحقیقات جهاد دانشگاهی اصفهان	۱۳۸۹
۱۲	ساخت صفحات دوقطبی پلیمری ترموپلاستیک برای پیل سوختی پلیمری		۱۳۸۴
۱۳	ارزیابی مواد و تجهیزات لازم برای بومی سازی حداکثری پیل سوختی اکسید جامد در کشور	پژوهشگاه نیرو	۱۳۸۹
۱۴	طراحی و ساخت پیل سوختی پلیمری ده کیلووات با امکان استفاده از الکتریسیته و حرارت به طور همزمان	سانا	۱۳۸۹

استانداردهای فناوری پیل سوختی که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوطه توسط موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی تهیه شده و در کمیسیون‌ها و سازمان‌های مرتبط مورد تایید قرار گرفته، به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر شده است.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ایران در مواقع لزوم تجدیدنظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای تکمیل و یا اصلاح و همچنین استاندارد جدید ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین همواره باید از آخرین تجدیدنظر استاندارد استفاده کرد.

در جدول ۸-۲ استانداردهایی که تاکنون در حوزه هیدروژن و پیل سوختی در موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران تدوین شده‌اند، ارائه می‌شود. لازم به ذکر است تاکنون استاندارد بیش از این از طرف سازمان استاندارد ارائه نشده است.

جدول ۸-۲: استانداردهای تدوین شده در مورد پیل سوختی در داخل کشور

شماره استاندارد	توضیحات	سال تصویب
۱۰۸۷۳-۱	خودروهای جاده‌ای پیل سوختی-ویژگی‌های ایمنی-قسمت اول-ایمنی عملیاتی خودرو	۱۳۸۶
۱۱۶۳۰	خودروهای جاده‌ای پیل سوختی-اندازه‌گیری مصرف انرژی-خودروهای با سوخت	۱۳۹۳
۱۲۰۸۴-۲	خودروهای جاده‌ای پیل سوختی-ویژگی‌های ایمنی قسمت دوم-حفاظت در برابر خطرات هیدروژن برای خودروهای با سوخت هیدروژن فشرده	۱۳۸۸
۱۲۰۸۴-۳	خودروهای جاده‌ای پیل سوختی-ویژگی‌های ایمنی قسمت سوم-حفاظت افراد در برابر شوک الکتریکی	۱۳۸۸
۹۸۱۴-۲	فن‌آوری‌های سلول سوختی-قسمت دوم-واحدهای سلول سوختی	۱۳۸۶
۹۸۱۴-۱-۱	فن‌آوری پیل سوختی-قسمت ۱-۳-سیستم‌های قدرت پیل سوختی ثابت-ایمنی	۱۳۸۷
۹۸۱۴-۳-۳	فن‌آوری پیل سوختی-قسمت ۳-۳-سیستم‌های قدرت پیل سوختی ثابت-نصب	۱۳۸۷
۹۸۱۴-۵-۱	فن‌آوری‌های پیل سوختی-قسمت ۱-۵-سیستم‌های توان پیل سوختی قابل حمل-ایمنی	۱۳۸۹
۶-۲۰۰ ۹۸۱۴	فن‌آوری پیل سوختی-قسمت ۶-۲۰۰-سامانه‌های تولید توان میکرو پیل سوختی-روش‌های آزمون عملکرد	۱۳۹۳
۶-۱۰۰ -IEC ۶۲۲۸۲ ISIRI	فن‌آوری‌های پیل سوختی-قسمت ۶-۱۰۰-سیستم‌های قدرت میکروپیل سوختی-ایمنی	۱۳۸۹
۶-۳۰۰ -IEC ۶۲۲۸۲ ISIRI	فن‌آوری‌های پیل سوختی-قسمت ۶-۳۰۰-سیستم‌های قدرت میکروپیل سوختی-قابلیت تعویض‌پذیری کارتریج سوخت	۱۳۸۹

در این بین استانداردهای مربوط به تجهیزات ساکن به شرح زیر می‌باشند: ۹۸۱۴-۲، ۹۸۱۴-۱-۱ و ۹۸۱۴-۳-۳، که اطلاعات آنها در قسمت قبل ارائه شده است.

مراجع

- [1]U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, “Types of Fuel Cells,” <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/types.html#sofc> (December 8, 2003).
- [2]U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, “Hydrogen: Fuel Cells”, http://www.eere.energy.gov/RE/hydrogen_fuel_cells.html (December 19, 2003).
- [3]U.S. Department of Energy, Fossil Energy.Gov, “Future Fuel Cells”, <http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/fuelcells/> (December 19, 2003).
- [4]Shekhawat, D., Spivey, J.J. and Berry, D.A. Fuel Cells, Technologies for fuel processing. Oxford : Elsevier B.V., 2011. pp. 1-566.
- [5]Singhal, S.C. and Kendall, K. High temperature solid oxide fuel cell: Fandamentals,design and applications. John Wiley, 2003.
- [6]Goodenough, John B. and Huang, Yun-Hui. Alternative anode materials for solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources, 2007, Vol. 173, pp. 1–10.
- [7]Gross, M. D., Vohs, J. M. and Gorte, R. J. Recent progress in SOFC anodes for direct utilization of hydrocarbons. Journal of Materials Chemistry, 2007, Vol. 17, pp. 3071–3077.
- [8]Gorte, R.J. and Vohs, J.M. Novel SOFC anodes for the direct electrochemical oxidation of hydrocarbons. Journal of Catalysis, 2003, Vol. 216, pp. 477–486.
- [9]Jiang, San Ping and Chan, Siew HWA. A review of anode materials development in solid oxide fuel cells. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE, 2004, Vol. 39, pp. 4405 – 4439.
- [10]Meusinger, J., Riensche, E. and Stimming, U. Reforming of natural gas in solid oxide fuel cell systems. Journal of Power Sources, 1998, pp. 315–320.
- [11]<http://atlascoenergy.com>
- [12]<http://www.fuelcells.org/FCInstallationChart.pdf>
- [13]<http://arian-solar.com>
- [14]PAFC History & Successes, John Ferro, UTC Power.
- [15]UTC Power Fuel Cell Programs, December 2009.
- [16]Present and Future of PAFC at Fuji Electric, Kenichi Kuroda, Fuji Electric.
- [17]www.fujielectric-europe.com.
- [18]Electric Power & Heat Generation Using UTC Fuel Cells’PC25C Power Plant & Anaerobic Digester Gas, Prepared by Greenhouse Gas Technology Center Southern Research Institute.
- [19]Fuel Cells: From Fundamentals to Applications, Supramaniam Srinivasan.
- [20]https://en.wikipedia.org/wiki/Molten_carbonate_fuel_cell

- [21]Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development. DOSSIER, INTERNATIONAL STATUS OF MOLTEN CARBONATE FUEL CELLS TECHNOLOGY, 2015.
- [22]Overview Standard & Code Considerations for Stationary Fuel Cell Installations In the United States. July 14, 2009. Caroline Judy, County of Santa Clara. Karla Conmy.
- [23]NFPA 85, Standard for the Installation of Stationary Fuel Cell Power Systems Edition 2007.
- [24]PEG CONFERENCE (Protection Engineers Group), DALLAS, TX-MARCH 14-16, 2017
- [25] NREL (National Renewable Energy Laboratory) is a U.S. Department of Energy Laboratory Operated by Midwest Research Institute. Battelle. Thomas Basso.
- [26]Thomas Basso, National Renewable Energy Laboratory," IEEE 1547 and 2030 Standards for Distributed Energy Resources Interconnection and Interoperability with the Electricity Grid", 2014.
- [27]Regulations, Codes, and Standards for the Deployment of Stationary Fuel Cells, A TIA (TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION) REFERENCE GUIDE, tiaonline.org.
- [28]U.S. Department of Energy, Module 1 - Permitting Stationary Fuel Cell Installations (2004).
- [29]Fuel Cell Systems, L.J.M.J. Blomen, M.N. Mugerwa, 1994.
- [30]Demonstration of Fuel Cells to Recover Energy from an Anaerobic Digester Gas Phase 1 Conceptual Design, Preliminary Cost, and Evaluation Study. Project Summary, National Service Center for Environmental Publications, 1995.
- [31]Installation Permitting Guidance for hydrogen and fuel cell stationary applications. HYPER Project. www.hyperproject.eu.
- [32]HSG 243. Fuel Cells: Understand the hazards, control the risks. 2004. HSE Books ISBN 0-7176-2766-7.
- [33]BS EN 62282-3-3:2007. Fuel cell technologies – Part 3-3: Stationary fuel cell power systems -Installation.
- [34]HSE L56 Safety in the installation and use of gas systems and appliances. Gas Safety (Installation and use) Regulations 1998. Approved Code of Practice and Guidance. HSE Books. ISBN: 0717616355.
- [35]Bulk LPG Storage at Fixed Installations. Code of Practice 1, Parts 1 to 4. UKLPG.
- [36]RJ Lewis. Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials (11th edition), Volumes 13. John Wiley & Sons. November 2004. ISBN: 978-0-471-47662-7.
- [37]Installation permitting guidance for hydrogen and fuel cell stationary applications: UK version, Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive, 2009.

خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از پنجاه سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر نهصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیین نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تألیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. گزارش حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشرشده در سال های اخیر در سایت اینترنتی nezamfanni.ir قابل دستیابی می باشد.

A Guide to Using Fuel Cells with Stationary Applications

Second part: Studies and Documentation of Fuel Cells with Stationary Application

[No. 810-2]

Implementation Niroo research institute

Project Manager Morteza Torabi M.Sc of Metallurgy Eng

Authors & Contributors Committee:

Omid Shahhoseini	Niroo research institute	M.Sc. of Electrical Eng
Hamed Mohebbi Moshae	Niroo research institute	M.Sc of Metallurgy Eng
Amir Hajali Rezayi	Niroo research institute	M.Sc. of Chemical Eng
Seyed Mohammad Montazeri	Niroo research institute	M.Sc of Metallurgy Eng
Salmy Assadat Sadrinejad	Niroo research institute	M.Sc of Renewable Energies Eng
Mahdi Mobaraki	Niroo research institute	M.Sc of Metallurgy Eng
Nasim Akbari Kafshgari	Niroo research institute	M.Sc. of Electrical Eng

Confirmation Committee:

Parviz Ramazanpour	Niroo research institute	PHD of Electrical Eng
Niki Moslemi	Niroo research institute	M.Sc. of Electrical Eng.
Zahra Madihi Bidgoli	Niroo research institute	M.Sc. of Electrical Eng.

Steering Committee(Plan and Budget Organization):

Alirez Toutouchi	Deputy of Technical and Executive Affairs Department
Farzaneh Agharamzanali	Head Group of Technical and Executive Affairs Department
Mohammad Reza Talaoob	Expert Engineering, Technical and Executive Affairs Department
Seyed Vahidedin Rezvani	Expert Engineering, Technical and Executive Affairs Department
Alireza Fakhrrahimi	Expert Engineering, Technical and Executive Affairs Department

Abstract:

The widespread use of hydrogen as an energy source can help concerns about energy security, global climate change and air quality. Such a fuel could be a cleaner and more efficient compared to fossil fuels such as gasoline, diesel and so on. Hydrogen can be produced using different technologies and can also be used with storage in renewable technologies in different seasons. Using this fuel in combustion processes and fuel cells, a wide range of energy services such as lighting, transportation, heating, cooling and cooking can be provided.

The purpose of writing standard regulations for fuel cells is to use fuel cell technology with stationary application in buildings, enclosures and open spaces. To this target, regulations, standards and information of processes have been reviewed and the relevant codes and standards provided to design, approve, install, operate and maintenance fuel cell technology. It is used as a tool to determine the codes and standards applicable to installation of stationary fuel cell systems that supply residential and commercial buildings and may also generate additional heat that can provide other necessary energy such as building heating.

Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization

**A Guide to Using Fuel Cells with Stationary
Applications**

Second part: Studies and Documentation

No. 810-2

Last Edition: 05-12-2020

Deputy of Technical and Infrastructure
Development Affairs

Ministry of Energy

Department of Technical and Executive
Affairs

Niroo Research Institute

nezamfanni.ir

Nri.ac.ir

2022

این نشریه

با عنوان «راهنمای استفاده از پیل‌های سوختی با کاربرد ساکن» به تفکیک دربردارنده تعاریف و اصطلاحات، بررسی و مرور پیشینه پیل سوختی و کاربرد آن، تبیین الزامات فنی و مهندسی محصولات پیل سوختی، بررسی استانداردهای بین‌المللی پیل سوختی، بررسی استانداردهای طراحی، تولید، نصب و راه‌اندازی و تعمیر و نگهداری، بررسی اسناد بالادستی و سندهای توسعه فناوری، الزامات فنی کاربردهای ساکن در داخل کشور و بررسی محصولات قبلی ساخته شده در حوزه پیل سوختی در داخل کشور می‌باشد.