



پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

<http://cpdi.ir/news/id/3086/>

۱۳۹۸/۲/۲۳



فهرست مطالب

۱۵.....	۱ فصل اول (پیل سوختی اکسید جامد).....
۱۶.....	۱-۱ نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد.....
۱۸.....	۱-۲ اجزای اصلی پیل سوختی اکسید جامد.....
۱۸.....	۱-۲-۱ کاتد.....
۱۹.....	۱-۲-۲ الکترولیت.....
۲۰.....	۱-۲-۳ آنود.....
۲۱.....	۱-۲-۴ اتصال دهنده خارجی.....
۲۳.....	۱-۳ تاریخچه پیل سوختی اکسید جامد.....
۲۴.....	۱-۴ نمونه‌های SOFC ساخته شده در دنیا.....
۲۷.....	۲ فصل دوم (مزایا پیل سوختی اکسید جامد).....
۲۸.....	۲-۱ مقدمه.....
۲۸.....	۲-۲ راندمان.....
۲۹.....	۲-۳ انعطاف‌پذیری در سوخت.....
۲۹.....	۲-۴ آلاینده‌های خروجی از پیل سوختی جامد.....
۳۰.....	۲-۵ آلودگی صوتی.....
۳۲.....	۲-۶ طول عمر.....
۳۲.....	۲-۷ وزن.....
۳۳.....	۲-۸ حوزه‌های کاربرد.....
۳۳.....	۲-۸-۱ موبایل، نظامی و استراتژیک.....
۳۴.....	۲-۸-۲ توان کمکی (APU).....
۳۵.....	۲-۸-۳ گرما و قدرت ترکیبی در مقیاس کوچک (m-CHP).....
۳۶.....	۲-۸-۴ مقیاس متوسط-بزرگ.....
۳۷.....	۳ فصل سوم (مقایسه پیل‌ها و سیستم‌های تولید توان).....

۳۸	۳-۱) انواع پیل سوختی.....
۳۸	۳-۱-۱) پیل سوختی پلیمری.....
۳۹	۳-۱-۲) پیل سوختی قلیایی.....
۳۹	۳-۱-۳) پیل سوختی اسید فسفریک.....
۴۰	۳-۱-۴) پیل سوختی کربنات مذاب.....
۴۰	۳-۱-۵) پیل سوختی متانولی.....
۴۱	۳-۱-۶) پیل سوختی اکسید جامد.....
۴۳	۳-۲) مقایسه روش‌های سنتی تبدیل انرژی با پیل سوختی.....
۴۶	۴) فصل چهارم (فرآیندهای ساخت پیل سوختی اکسید جامد).....
۴۷	۴-۱) مقدمه.....
۴۸	۴-۲) انواع پیل‌های اکسید جامد از لحاظ لایه نگهدارنده سلول.....
۴۸	۴-۲-۱) زیرلایه.....
۴۹	۴-۲-۲) پایه الکترولیت.....
۴۹	۴-۲-۳) پایه کاتد.....
۵۱	۴-۲-۴) پایه آند.....
۵۱	۴-۲-۵) پایه متخلخل.....
۵۳	۴-۲-۶) پایه اتصال‌دهنده.....
۵۶	۴-۳) روش‌های ساخت زیرلایه‌های پیل سوختی اکسید جامد.....
۵۶	۴-۳-۱) فرایندهای سرامیک مرطوب.....
۶۸	۴-۳-۲) تکنیک‌های لایه نشانی مستقیم.....
۷۱	۴-۳-۳) روش‌های اسپری.....
۷۷	۴-۴) نتیجه‌گیری.....
۷۹	۵) فصل پنجم (هزینه‌های ساخت و تولید).....
۸۰	۵-۱) مدل هزینه ساخت SOFC توسط Battelle.....
۸۰	۵-۲) رویکرد.....

۵-۳	تجزیه و تحلیل بازار.....	۸۱
۵-۳-۱	نیازمندی‌های بازار و ویژگی‌های موردنظر.....	۸۱
۵-۳-۲	انتخاب فناوری.....	۸۱
۵-۳-۳	نتیجه‌گیری تجزیه و تحلیل بازار.....	۸۲
۵-۴	مشخصات سیستم.....	۸۲
۵-۴-۱	توضیحات عمومی.....	۸۲
۵-۴-۲	معیارهای اسمی.....	۸۲
۵-۴-۳	پیکربندی سیستم.....	۸۴
۵-۵	تجزیه و تحلیل هزینه تولید.....	۸۶
۵-۵-۱	دامنه هزینه سیستم.....	۸۶
۵-۵-۲	رویکرد هزینه سیستم.....	۸۶
۵-۵-۳	پیش‌بینی هزینه‌های ساخت سیستم.....	۸۶
۵-۵-۴	هزینه‌های ماشین.....	۸۷
۵-۵-۵	هزینه‌های مواد.....	۸۷
۵-۵-۶	هزینه تولید سیستم SOFC.....	۸۷
۵-۶	محدودیت‌های آنالیز.....	۹۹
۵-۶-۱	هزینه‌های تولید استک SOFC.....	۹۹
۵-۷	تجزیه و تحلیل هزینه.....	۹۹
۵-۷-۱	سیستم‌های SOFC CHP.....	۹۹
۵-۸	کاهش هزینه‌های آینده.....	۱۰۸
۵-۹	نتیجه‌گیری.....	۱۰۸
۵-۹-۱	خلاصه هزینه‌ی سیستم.....	۱۰۸
۵-۹-۲	پیشنهاد ارزش.....	۱۱۱
۵-۱۰	مدل هزینه ساخت SOFC توسط مایاس و همکاران.....	۱۱۲
۵-۱۰-۱	نتیجه‌گیری.....	۱۱۷

۱۱۸	فصل (۶) (شناسایی نقاط گلوگاهی فنی و اقتصادی فعلی و روش‌های حل آن)
۱۱۹	(۶-۱) مقدمه
۱۱۹	(۶-۲) طول عمر
۱۱۹	(۶-۲-۱) حل ناپایداری مواد
۱۱۹	(۶-۲-۲) استفاده از میدان الکتریکی
۱۲۰	(۶-۲-۳) نوع تکیه‌گاه پیل سوختی
۱۲۱	(۶-۲-۴) پیل سوختی اکسید جامد هادی پروتون میکرو صفحه‌ای
۱۲۲	(۶-۳) آب‌بندی
۱۲۳	(۶-۳-۱) خواص آب‌بندی
۱۲۳	(۶-۳-۲) مشکلات آب‌بندی‌ها
۱۲۴	(۶-۴) انواع آب‌بندی بکار برده شده
۱۲۴	(۶-۵) گران بودن
۱۲۴	(۶-۵-۱) مواد به کار رفته در ساخت پیل
۱۲۵	(۶-۵-۲) تعداد تولید و سائز سیستم پیل سوختی
۱۲۵	(۶-۶) نتیجه‌گیری
۱۲۸	فصل (۷) (بررسی برنامه‌های کشورها و شرکت‌های تولید کننده SOFC)
۱۲۹	(۷-۱) مقدمه
۱۲۹	(۷-۲) قاره آمریکا شمالی
۱۲۹	(۷-۲-۱) Atrex Energy
۱۳۰	(۷-۲-۲) Bloom Energy
۱۳۰	(۷-۲-۳) Ceramatec
۱۳۱	(۷-۲-۴) Delphi
۱۳۲	(۷-۲-۵) Fuel Cell Energy
۱۳۳	(۷-۲-۶) Materials and systems Research, Inc. (MSRI)
۱۳۴	(۷-۲-۷) Protonex

۱۳۴.....	Ultra USSI(۷-۲-۸
۱۳۶.....	(۷-۳) قاره اروپا
۱۳۶.....	Elcogen(۷-۳-۱
۱۳۷.....	Adelan(۷-۳-۲
۱۳۸.....	Bosch Thermotechnology(۷-۳-۳
۱۳۹.....	Ceres Power (۷-۳-۴
۱۴۰.....	Convion Ltd(۷-۳-۵
۱۴۱.....	Kerafol GmbH(۷-۳-۶
۱۴۲.....	Hexis / Viesmann (۷-۳-۷
۱۴۳.....	mPower GmbH (۷-۳-۸
۱۴۴.....	Plansee SE (۷-۳-۹
۱۴۵.....	(۷-۴) قاره آسیا
۱۴۵.....	Aisin Seiki(۷-۴-۱
۱۴۶.....	G-cell Technology Co., LTD(۷-۴-۲
۱۴۷.....	h2e Power Systems Inc.(۷-۴-۳
۱۴۸.....	Mitsubishi-Hitachi Heavy Industries (MHI)(۷-۴-۴
۱۴۹.....	POSCO Energy(۷-۴-۵
۱۵۰.....	(۷-۵) وزارت انرژی آمریکا
۱۵۲.....	(۷-۶) برنامه‌های کشور ژاپن
۱۵۷.....	(۷-۷) جمع‌بندی
۱۵۷.....	(۷-۷-۱) وضعیت کنونی تکنولوژی پیل سوختی در جهان و ایران
۱۶۰.....	(۸) جمع‌بندی
۱۶۱.....	(۸-۱) آینده متصور برای SOFC
۱۶۲.....	(۸-۲) پیشنهادهایی برای ایران
۱۶۳.....	(۹) پیوست

۱۶۴	 (۹-۱) پیوست ۱ (جزئیات هزینه و ساخت پیل سوختی توسط Battelle)
۱۶۴	 (۹-۱-۱) اندازه‌ی اجزاء SOFC و مراحل تولید سلول سرامیک
۱۶۶	 (۹-۱-۲) سلول سرامیکی سیستم SOFC
۱۶۷	 (۹-۱-۳) صفحه‌های انتهایی سیستم SOFC
۱۷۰	 (۹-۱-۴) سیستم‌های اتصال SOFC
۱۷۱	 (۹-۱-۵) قاب‌های SOFC
۱۷۴	 (۹-۱-۶) جوش لیزری SOFC
۱۷۵	 (۹-۱-۷) آب‌بندی سرامیک شیشه‌ای سیستم SOFC
۱۷۶	 (۹-۱-۸) SOFC Mesh
۱۷۹	 (۹-۱-۹) مونتاژ استک SOFC
۱۸۰	 (۹-۱-۱۰) لحیم‌کاری استک SOFC
۱۸۱	 (۹-۱-۱۱) تست و بهبود استک SOFC
۱۸۲	 (۹-۲) هزینه‌های ساخت استک
۱۸۴	 (۹-۳) ارزیابی هزینه‌های تولید BOP سیستم SOFC
۱۸۵	 (۹-۳-۱) سیستم اصلاح‌کننده‌ی بخار SOFC
۱۸۷	 (۹-۳-۲) مبدل حرارتی SOFC Recuperative Cathode System
۱۸۹	 (۹-۳-۳) مفروضات هزینه BOP، سیستم SOFC
۱۹۲	 (۹-۴) پیوست ۲ (وب سایت شرکت‌های تولیدکننده SOFC)
۱۹۶	 (۱۰) References

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد ۱۶
- شکل ۳-۱ محدوده دمایی برای انواع مواد مورد استفاده در ساخت الکترولیت ۱۹
- شکل ۴-۱ مرزهای ۳ فازي یا TPB ۲۰
- شکل ۵-۱ پیل سوختی وایزبارت و روکا در شرکت وستینگ هاوس الکتریک سال ۱۹۶۲ ۲۳
- شکل ۶-۱ پیل سوختی اکسید جامد ساخته شده توسط Aisin ۲۴
- شکل ۷-۱ پیل سوختی اکسید جامد ساخته شده توسط Kyocera ۲۵
- شکل ۸-۱ مقایسه سه نوع محصول متفاوت از سه شرکت متفاوت ۲۵
- شکل ۹-۱ مقایسه پیل‌های سوختی شرکت‌های مختلف ۲۶
- شکل ۱-۲ مقایسه پیل سوختی جامد و سایر سیستم‌های تولید توان ۲۸
- شکل ۲-۲ مقایسه تولید CO_2 خروجی از سیستم‌های Combustion و SOFC ۳۰
- شکل ۳-۲ صدای نسبی میان پیل سوختی (Protonex) و سیستم‌های مختلف ۳۱
- شکل ۴-۲ سطوح صدای نسبی میان پیل سوختی (Delphi) و سیستم‌های مختلف ۳۱
- شکل ۵-۲ وزن سه نوع سیستم (Battery, SOFC, PEM) ۳۲
- شکل ۶-۲ سیستم بدون سرنشین iRobot PackBot UGV AM ۳۳
- شکل ۷-۲ یک مدل از APU شرکت Delphi ۳۴
- شکل ۸-۲ مقایسه سیستم‌های تولید مرسوم و SOFC APU ۳۵
- شکل ۹-۲ مقایسه بین سیستم‌های CHP با گرمایش پیل سوختی و سیستم معمولی ۳۶
- شکل ۱۰-۲ سیستم SEAC با بازده ۵۰٪ ۳۶
- شکل ۱-۳ پیل سوختی پلیمری و واکنش‌های مربوطه ۳۸
- شکل ۲-۳ پیل سوختی قلیایی و واکنش‌های مربوطه ۳۹
- شکل ۳-۳ پیل سوختی اکسید فسفریک و واکنش‌های مربوطه ۳۹
- شکل ۴-۳ پیل سوختی کربنات مذاب و واکنش‌های مربوطه ۴۰
- شکل ۵-۳ پیل سوختی متانولی و واکنش‌های مربوطه ۴۰
- شکل ۶-۳ پیل سوختی اکسید جامد و واکنش‌های مربوطه ۴۱

- شکل ۷-۳ انواع پیل سوختی در یک مدل ۴۱
- شکل ۸-۳ مقایسه پیل سوختی و ژنراتورها ۴۳
- شکل ۹-۳ تولید توان در سیستم‌های مختلف ۴۳
- شکل ۱-۴ شماتیکی از انواع تکیه‌گاه‌ها [13] ۴۸
- شکل ۲-۴ نمایش پیل سوختی اکسید جامد پایه الکترولیت ۴۹
- شکل ۳-۴ نمایش پیل سوختی اکسید جامد پایه کاتد ۵۰
- شکل ۴-۴ نمایش پیل سوختی پایه متخلخل ۵۱
- شکل ۵-۴ نمایش پیل سوختی پایه متخلخل ۵۲
- شکل ۶-۴ تکیه‌گاه فلزی ۵۳
- شکل ۷-۴ نمایش پیل سوختی اکسید جامد پایه اتصال دهنده ۵۴
- شکل ۸-۴ انواع تیکه‌گاه‌ها در دو حالت صفحه‌ای و لوله‌ای ۵۴
- شکل ۹-۴ شماتیکی از فرایند ریخته‌گری نواری [17] ۵۷
- شکل ۱۰-۴ تاثیر احیاء NiO به Ni در تخلخل ۵۸
- شکل ۱۱-۴ شماتیکی از روش چاپ صفحه‌ای ۵۹
- شکل ۱۲-۴ شماتیکی از کل فرایند برای ساخت تک سل SOFC به روش ترکیبی در روش ۱ [20] ۶۰
- شکل ۱۳-۴ شماتیکی از کل فرایند برای ساخت تک سل SOFC به روش ترکیبی در روش ۲ [20] ۶۱
- شکل ۱۴-۴ پروسه ساده شده فرایندهای سل - ژل [23] ۶۳
- شکل ۱۵-۴ مکانیزم الکتروکاتالیز لایه نشانی با هم [13] ۶۵
- شکل ۱۶-۴ لایه نشانی الکتروفوریتیک برای لایه نشانی تکیه‌گاه آندی SOFC استوانه‌ای شکل ۶۶
- شکل ۱۷-۴ مراحل فرایند اسپری پودر مرطوب ۶۷
- شکل ۱۸-۴ روش PVD ۶۸
- شکل ۱۹-۴ شماتیکی از اصول فرایند EVD. لایه نشانی بخار شیمیایی CVD ۶۹
- شکل ۲۰-۴ ریزساختار یک الکترولیت EVD بر روی یک زیرلایه متخلخل کاتد [18] ۷۰
- شکل ۲۱-۴ شماتیکی از لایه نشانی به روش CVD [30] ۷۱

شکل ۴-۲۲ شماتیک از فرایند اسپری حرارتی (a,b) HVOF اسپری پلاسما (c) اسپری قوسی (d) اسپری	شعله [13].....	۷۲
شکل ۴-۲۳ شماتیک از اسپری پلاسما شعاعی و محوری [25].....		۷۴
شکل ۴-۲۴ ریز ساختار مقطع پوشش با تورچ پلاسما با تغذیه پودر محوری [31].....		۷۴
شکل ۴-۲۵ نمای کلی از فرایند اسپری پیرولیز [32].....		۷۵
شکل ۴-۲۶ شماتیک از فرایند لایه نشانی لیزر پالسی [33].....		۷۶
شکل ۵-۱ تعداد پیل‌های سوختی نصب شده بر اساس نوع سوخت.....		۸۱
شکل ۵-۲ سیستم SOFC CHP.....		۸۴
شکل ۵-۳ سیستم PEM CHP.....		۸۵
شکل ۵-۴ جزئیات مجموعه‌ی پیل SOFC.....		۸۸
شکل ۵-۵ واحدهای تکرارشونده‌ی سلول نمایانگر قطعات اصلی.....		۸۸
شکل ۵-۶ فرآیند تولید پیل SOFC.....		۸۹
شکل ۵-۷ شماتیک هزینه‌های استک پیل سوختی با توان ۱ و ۵ کیلووات.....		۹۰
شکل ۵-۸ شماتیک هزینه‌های استک پیل سوختی با توان ۱۰ و ۲۵ کیلووات.....		۹۱
شکل ۵-۹ شماتیک هزینه‌های استک پیل سوختی با توان ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات.....		۹۲
شکل ۵-۱۰ توزیع هزینه‌های ۱ و ۵ و ۱۰ کیلووات.....		۹۳
شکل ۵-۱۱ توزیع هزینه‌های ۲۵ و ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات.....		۹۴
شکل ۵-۱۲ توزیع هزینه‌ها به صورت حجمی ۱ و ۵ کیلووات.....		۹۵
شکل ۵-۱۳ توزیع هزینه‌ها به صورت حجمی ۱۰ و ۲۵ کیلووات.....		۹۶
شکل ۵-۱۴ توزیع هزینه‌ها به صورت حجمی ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات.....		۹۷
شکل ۵-۱۵ هزینه‌ی سیستم SOFC برای ۱ تا ۲۵۰ کیلووات برای حجم تولید ۱۰۰۰ واحد در سال ... ۱۰۰		
شکل ۵-۱۶ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۱ کیلووات.....		۱۰۱
شکل ۵-۱۷ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۵ کیلووات.....		۱۰۲
شکل ۵-۱۹ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۲۵ کیلووات.....		۱۰۴
شکل ۵-۲۱ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۲۵۰ کیلووات.....		۱۰۶

- شکل ۵-۲۴ مجموع هزینه‌های نصب سیستم گرمایش و قدرت بر اساس حجم تولید ۱۱۰
- شکل ۵-۲۵ تغییرات هزینه ساخت استک با سایز سیستم ۱۱۳
- شکل ۵-۲۶ تغییرات هزینه ساخت استک با نرخ تولیدات سالیانه ۱۱۳
- شکل ۵-۲۷ هزینه‌های ساخت استک ۱۱۴
- شکل ۵-۲۸ هزینه استک با درصد نسبی هزینه اجزای استک به هزینه کلی استک برای سیستم‌های ۵۰ کیلو وات ۱۱۴
- شکل ۵-۲۹ هزینه استک با درصد نسبی اجزای هزینه به کل هزینه استک برای سیستم ۵۰ kWe ۱۱۵
- شکل ۵-۳۰ آنالیز حساسیت برای سیستم‌های ۵۰ کیلووات با حجم تولید ۱۰۰ سیستم در سال ۱۱۶
- شکل ۵-۳۱ آنالیز حساسیت برای سیستم‌های ۵۰ کیلووات با حجم تولید ۵۰۰۰۰ سیستم در سال ۱۱۶
- شکل ۶-۱ تاثیر انتخاب نوع پایه بر روی دمای عملکردی پیل ۱۲۱
- شکل ۶-۲ نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد هادی پروتون ۱۲۲
- شکل ۷-۱ طراحی لوله‌ای SOFC، Artex Energy و اصول کارکرد ۱۲۹
- شکل ۷-۲ UPM-570 با خروجی برق اسمی ۱۶۰ کیلووات ۱۳۰
- شکل ۷-۳ پیل سوختی Ceramatec تک سلولی پایه آندی ۱۳۱
- شکل ۷-۴ استک SOFC دلفی ۱۳۱
- شکل ۷-۵ بلوک ساختمان پایه استک: FCE / Versa SOFC ۱۳۲
- شکل ۷-۶ بسته‌بندی ۳۶ لوله برای یک واحد قدرت قابل حمل ۳۰۰ وات ۱۳۳
- شکل ۷-۷ P200i ۱۳۴
- شکل ۷-۸ USSI D350 ۱۳۵
- شکل ۷-۹ چپ استک E3000, 3kW ، راست استک E1000, 1kW ۱۳۶
- شکل ۷-۱۰ پیل سوختی شرکت Elcogen ۱۳۷
- شکل ۷-۱۱ SOFC میکرو لوله‌ای Adelan ۱۳۷
- شکل ۷-۱۲ BOSCH's Cerapower energy center ۱۳۸
- شکل ۷-۱۳ Detail of Ceres Power's single ۱۳۹
- شکل ۷-۱۴ Ceres Power fuel cell ۱۴۰

- شکل ۷-۱۵.....Convion's C50 product efficiency ۱۴۰
- شکل ۷-۱۶ چپ تنوع مختلف زیرلایه‌های الکترولیت، راست پیل‌های با تکیه‌گاه الکترولیت ۱۴۲
- شکل ۷-۱۷ اصول کار پیل سوختی Hexis ۱۴۲
- شکل ۷-۱۸ The Hexis Galileo 1000N m-CHP model ۱۴۳
- شکل ۷-۱۹ مشخصه‌های کلیدی استک‌های mPower ۱۴۴
- شکل ۷-۲۰ پیل تکیه‌گاه فلزی Plansee ۱۴۴
- شکل ۷-۲۱ شماتیکی از An Ene Farm type S m-CHP system ۱۴۵
- شکل ۷-۲۲ استک و سلول‌های SOFC تکنولوژی G-cell ۱۴۷
- شکل ۷-۲۳ Artist's impression of a h2e Power Generator ۱۴۸
- شکل ۷-۲۴ سیستم کوپل شده SOFC-microturbine 250kW توسط MHI ۱۴۸
- شکل ۷-۲۵ Mitsubishi در حال توسعه سیستم SOFC-turbine triple combined cycle ۱۴۹
- شکل ۷-۲۶ نسل بعدی محصولات SOFC 300 kW ۱۴۹
- شکل ۷-۲۷ شرکت‌های توسعه‌دهنده پیل سوختی اکسید جامد در آمریکا ۱۵۰
- شکل ۷-۲۸ میزان سرمایه‌گذاری توسط وزارت انرژی آمریکا و شرکت‌ها در طول سال‌های مختلف ۱۵۰
- شکل ۷-۳۰ روند تجاری‌سازی تا سال ۲۰۱۹ ۱۵۱
- شکل ۷-۳۱ اهداف برنامه‌های SOFC ۱۵۱
- شکل ۷-۳۲ خط زمان توسعه برنامه SOFC ۱۵۲
- شکل ۷-۳۳ قیمت نهایی پیل سوختی و کاهش آن ۱۵۲
- شکل ۷-۳۴ تکفیک میزان استفاده از نوع سیستم، نوع سوخت و نوع خانه ۱۵۳
- شکل ۷-۳۵ نقشه راه توسعه هیدروژن و پیل‌های سوختی در ژاپن ۱۵۴
- شکل ۷-۳۶ وضعیت کنونی و اهداف پیشرو استفاده از پیل سوختی در صنعت ۱۵۵
- شکل ۷-۳۷ بودجه ۲۰۱۸ NEDO برای پیل سوختی و هیدروژن ۱۵۵
- شکل ۷-۳۸ چشم انداز برنامه‌های جاری NEDO ۱۵۶
- شکل ۹-۱ اندازه پیل SOFC دارای ۲۰۱ ناحیه‌ی فعال ۱۶۴
- شکل ۹-۲ اندازه‌ی SOFC دارای ۴۰۰ ناحیه‌ی فعال ۱۶۵

- شکل ۳-۹ اندازه‌ی SOFC دارای ۴۱۴ ناحیه‌ی فعال ۱۶۵
- شکل ۴-۹ اندازه‌ی صفحه‌ی انتهایی سیستم SOFC دارای ۲۰۱ سانتی متر مربع ناحیه‌ی فعال ۱۶۷
- شکل ۵-۹ اندازه‌ی صفحه‌ی انتهایی سیستم SOFC دارای ۴۰۰ سانتی متر مربع ناحیه‌ی فعال ۱۶۸
- شکل ۶-۹ اندازه‌ی صفحه‌ی انتهایی سیستم SOFC دارای ۴۱۴ سانتی متر مربع ناحیه‌ی فعال ۱۶۹
- شکل ۷-۹ دیاگرام شماتیک Catacel SSR ۱۸۵
- شکل ۸-۹ دیاگرام شماتیک اصلاح کننده با ژنراتور بخار ۱۸۵
- شکل ۹-۹ ابعاد طرح مبدل حرارتی SOFC ۱۸۷

مقدمه

سوخت‌های فسیلی منابع انرژی رو به زوالی هستند که جامعه رو به توسعه انسانی را در آینده‌ای نه چندان دور دچار کمبود سوخت می‌سازند. با رشد سریع جمعیت دیگر نیاز به منابع پایان‌ناپذیر سوخت افزایش خواهد یافت. از طرفی وسعت آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی زندگی در کره خاکی را دچار مشکل ساخته است. در این ارتباط شاهد وضع قوانین سخت زیست محیطی و تخصیص اعتبارهایی برای تحقیق در زمینه بهره‌برداری از انرژی نو بوده‌ایم.

به هر ترتیب ضرورت انتخاب جایگزین مناسب، ارزان قیمت و تمیز برای سوخت‌های فسیلی آشکار است. از جمله انرژی‌های مطرح، انرژی الکتریکی تولید شده به وسیله پیل‌های سوختی است که به دلیل بازدهی بسیار بالا و عدم آلاینده‌ی محیط زیست و نیز مصرف هیدروژن به عنوان سوخت، در حال حاضر راه حل مناسبی جهت عبور از تنگنای انرژی و آلودگی محیط زیست می‌باشد. پیل‌های سوختی دارای قسمت یا قسمت‌های متحرک نیستند، بنابراین به تعمیر یا تعویض قطعات احتیاج ندارند. صدای ناشی از کار پیل‌های سوختی بسیار کمتر از صدای موتور خودروهای احتراق داخلی است و احتمال انتقال پیل سوختی از یک خودروی از کار افتاده به خودروی دیگر وجود دارد. ابعاد استفاده از پیل‌های سوختی بسیار گسترده است، به عنوان مثال از آن‌ها در زیردریایی‌ها، سفینه‌های فضایی، کشتی‌ها، هواپیماها و... استفاده می‌کنند و یا آن‌ها را در خودروها اعم از اتوبوس‌ها، کامیون‌ها، مینی‌بوس‌ها و سواری‌ها به کار می‌برند. در مناطق دور افتاده‌ای که امکان استفاده از شبکه برق سراسری وجود ندارد، می‌توان از آن‌ها به مثابه نیروگاه استفاده کرد [1].

پیل‌های سوختی اکسید جامد پیل‌های سرامیکی حالت جامد هستند که معمولاً در محدوده دمایی بین ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند. به دلیل بالا بودن دمای کاری، بیشترین کاربرد این نوع از پیل‌های سوختی در تولید توان ساکن می‌باشد.

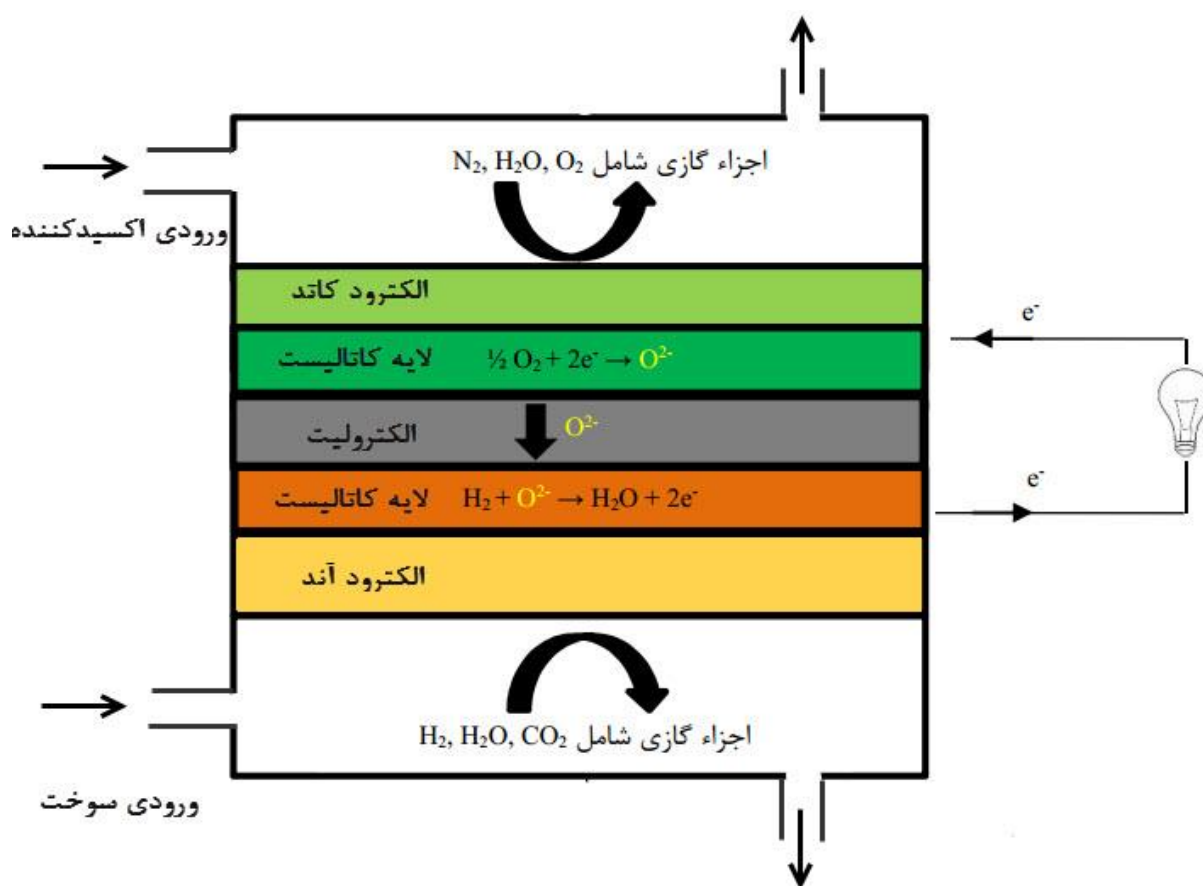
از میان هندسه‌های گوناگون پیل سوختی اکسید جامد، ساختار صفحه‌ای پیل سوختی اکسید جامد به دلیل کوتاه‌تر بودن مسیر جریان الکتریکی دارای توان تولیدی بیشتری می‌باشد. همچنین استک کردن پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای راحت‌تر می‌باشد. با این وجود، به دلیل بالا بودن دمای کاری پیل مشکلاتی از قبیل آب‌بندی پیل، مواد گران قیمت اجزاء سازنده پیل، بالا بودن هزینه‌های ساخت، بالا بودن تنش‌های حرارتی در اجزا پیل و ... خواهد داشت. در این گزارش به تمامی جوانب پیل سوختی اکسید جامد اشاره گردیده است.

پیل سوختی اکسید جامد

SOFC

۱-۱) نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد

پیل سوختی اکسید جامد معمولی از دو کانال، یکی برای سوخت و دیگری برای هوا (اکسیدکننده) تشکیل شده است که جریان سوخت و هوا را هر کدام به ترتیب به سطح الکترودهای آند و کاتد می‌رساند. الکترودهای آند و کاتد متخلخل می‌باشند لذا تخلخل الکترودها باعث می‌شود که اجزاء گازی هوا و سوخت از میان روزنه‌های موجود عبور کنند و خود را به نزدیکی سطح مشترک الکترود و الکترولیت برسانند که با لایه‌ای از یک کاتالیست مناسب پوشانده شده است [1]. شکل ۱-۱ ساختار و فرآیندهای مربوط به پیل سوختی نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد [2]

در این پیل سوختی واکنش‌های شیمیایی به قرار زیر اتفاق می‌افتد [1]:

واکنش کاتد:



واکنش آنود:

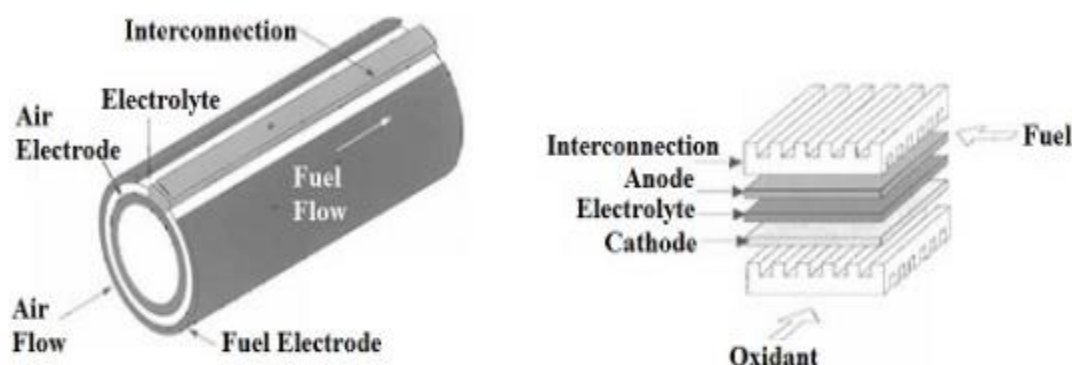


واکنش کلی پیل:



در اثر واکنش الکتروشیمیایی که در الکتروکاتد اتفاق می‌افتد واکنش (1) یون اکسیژن تولید می‌گردد. از آن‌جا که جنس الکترولیت از نوعی سرامیک می‌باشد که در محدوده دمای عملکرد پیل سوختی اکسید جامد یعنی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد (به تکنولوژی مواد بکار رفته در پیل بستگی دارد) خاصیت هدایت یونی دارد [3]، لذا الکترولیت یون اکسیژن تولید شده در سطح الکتروکاتد را از درون خود عبور می‌دهد و آن را به سطح الکتروکاتد می‌رساند تا طبق واکنش (2) با هیدروژن سوخت واکنش دهد و الکترون تولید گردد. با توجه به اینکه الکترولیت تنها خاصیت هدایت یونی دارد لذا الکترون تولید شده در سطح الکتروکاتد نمی‌تواند از الکترولیت عبور کند بنابراین از یک مدار خارجی خود را به سمت الکتروکاتد می‌رساند و این سیکل مدام تکرار می‌گردد. در اثر عبور الکترون از مدار خارجی برق تولید می‌گردد که می‌تواند برای مصارف گوناگون مورد استفاده قرار گیرد.

دو طرح متداول پیل سوختی اکسید جامد معمولی شامل هندسه صفحه‌ای و لوله‌ای می‌باشد که بطور شماتیک در شکل ۱-۲ نشان داده شده است:



شکل ۱-۲ شماتیک از دو طرح متداول پیل سوختی اکسید جامد معمولی [3]

۲-۱) اجزای اصلی پیل سوختی اکسید جامد

چهار جزء اصلی یک پیل سوختی اکسید جامد بدین قرارند: آند، الکترولیت، کاتد و اتصال دهنده. این اجزا و موارد تشکیل دهنده آنها به طور مبسوط در زیر مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۱-۲-۱) کاتد

کاتد برای ایجاد ویژگی انتقال جرم خوب باید میزان تخلل مناسبی داشته باشد و برای برقراری جریان الکترونی یک رسانای خوب باشد. کاتد همچنین باید دارای سطحی با تبادل سینتیکی مناسب برای اکسیژن و قابلیت انتقال یون اکسیژن بالا باشد. ماده کاتد به منظور کاهش ریسک شکست مکانیکی تحت تأثیر تنش‌های حرارتی، می‌بایست از نظر مکانیکی و شیمیایی با الکترولیت سازگار باشد.

ماده مرسوم برای کاتد در پیل سوختی اکسید جامد (Lanthanum Strontium Manganate (LSM می‌باشد که یک هادی جریان در دماهای بالا است. مشکل اصلی با قسمت کاتد عدم توانایی برای فراهم کردن مسیر انتقال جریان یونی است، بنابراین مناطق فعال به سطوح تبدالی کاتد-الکترولیت محدود هستند. جدول ۱ انواع مواد مورد استفاده برای کاتد را نشان می‌دهد [4]:

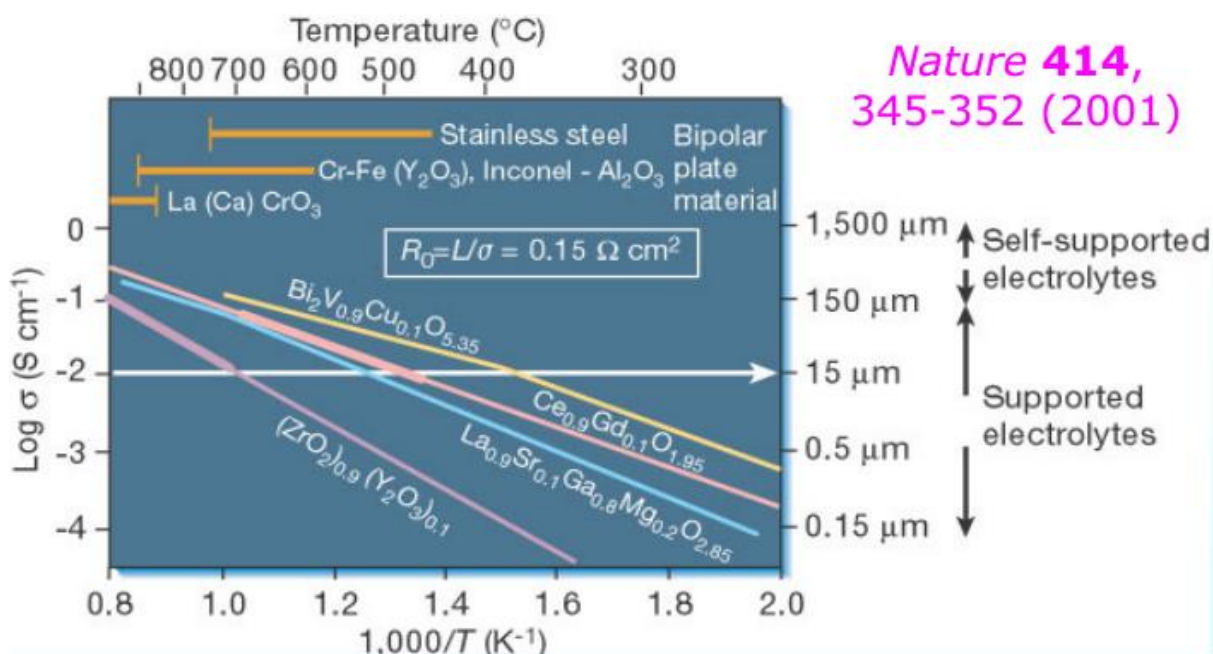
جدول ۱ مواد مورد استفاده برای کاتد و میزان رسانایی آنها برحسب دما [5]

ترکیب شیمیایی	T (K)	σ (S/cm)	ترکیب شیمیایی	T (K)	σ (S/cm)
$Ba_2In_2O_5$	973	5×10^{-3}	$Ba_3In_2HfO_8$	673	1×10^{-3}
	1223	1×10^{-1}	$Sr_3In_2HfO_8$	973	1×10^{-4}
$BaZrO_3$	973	1×10^{-6}	$Ba_3Sc_2ZrO_8$	973	7×10^{-3}
$BaZr_{0.5}In_{0.5}O_{2.75}$	973	1×10^{-2}	$Ba_2GdIn_{0.8}Ga_{0.2}O_5$	873	5×10^{-3}
$Ba_3In_2ZrO_8$	973	5×10^{-3}	$Ba_2GdIn_{0.8}Ga_{0.4}O_5$	873	5×10^{-3}
$Ba_3In_{1.7}Zr_{1.3}O_{8.15}$	973	5×10^{-2}	$Ca_2Cr_2O_5$	973	5×10^{-3}
$Ba_2In_{1.33}Zr_{0.67}O_{5.33}$	973	1×10^{-3}	Sr_2ScAlO_5	973	1×10^{-5}
$Ba_2In_{1.23}Ce_{0.25}O_{5.125}$	973	9×10^{-3}	$Sr_2Sc_{1.3}Al_{0.7}O_5$	973	1×10^{-3}
	1223	6×10^{-2}	$Sr_2ScAl_{0.8}Mg_{0.2}O_{4.9}$	973	5×10^{-4}
$Ba_3In_2TiO_8$	973	7×10^{-4}	$Sr_2ScAl_{0.8}Zn_{0.2}O_{4.9}$	973	2×10^{-4}
$Ba_3In_2ZrO_8$	673	6.8×10^{-3}	$Sr_2Sc_{0.8}Y_{0.2}AlO_5$	973	1×10^{-4}
$Ba_3In_2CeO_8$	673	1.5×10^{-3}	$Sr_{1.8}Ba_{0.2}ScAlO_5$	973	1×10^{-4}

۲-۲-۱) الکترولیت

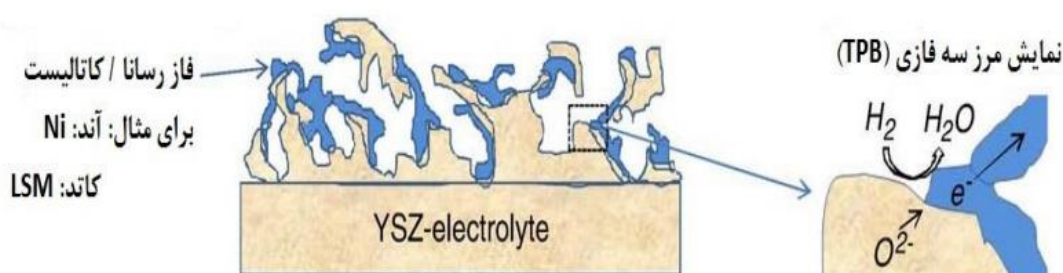
الکترولیت‌ها در پیل سوختی اکسید جامد باید دارای ویژگی هدایت یونی، بدون هیچگونه هدایت الکتریکی باشند. الکترولیت همچنین به منظور جلوگیری از نشت جریان و پدیده اتصال کوتاه باید چگال (بدون تخلخل) باشد. به منظور کاهش اتلافات مقاومتی باید آن را تا حد ممکن نازک ساخت. همچنین به مانند کاتد باید از لحاظ مکانیکی و شیمیایی پایدار باشد. داشتن عملکردی پایدار در هردو محیط کاهشی و اکسایشی یکی از مهمترین ویژگی‌های الکترولیت می‌باشد.

مرسوم‌ترین ماده مد نظر برای استفاده در الکترولیت Yttria-Stabilized-Zirconia (YSZ) در پیل-های سوختی اکسید جامد می‌باشد. اکسید زیرکونیوم، هم در محیط‌های کاهشی اطراف الکترود آند و هم در محیط‌های اکسایشی اطراف الکترود کاتد، بسیار پایدار می‌باشد، سمی نیست و دارای ترکیب شیمیایی پایدار است و در طبیعت به وفور یافت می‌شود و توانایی هدایت یون‌های اکسیژن به دلیل ساختار کریستالی O^{2-} فلوریت زیرکونیوم وجود دارد [5]. در شکل ۳-۱ محدوده دمایی برای انواع مواد مورد استفاده در ساخت الکترولیت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱ محدوده دمایی برای انواع مواد مورد استفاده در ساخت الکترولیت [6]

الکترولیت پیل سوختی نقش اساسی را در عملکرد پیل بر عهده دارد. الکترولیت در پیل‌های سوختی اکسید جامد به صورت یک لایه‌ی نازک و متراکم ساخته می‌شود و باعث جداسازی طرف آندی از قسمت کاتدی آن می‌گردد. در دمای بالا یون‌های اکسیژن از طریق غشای زیرکونیایی، از سمت کاتد و یا اصطلاحاً الکتروود هوا به سمت آند (الکتروود سوخت) انتقال داده شده و با توجه به نوع سوخت مورد استفاده آب، دی اکسید کربن، الکتروسیته و گرما تولید می‌شود. واکنش‌های الکتروشیمیایی در فاصله ۱۰ الی ۲۰ میکرومتری از فصل مشترک الکتروود الکترولیت انجام می‌شوند که به این منطقه، لایه‌ی عملکردی یا کاربردی گفته می‌شود. بهینه کردن ساختار این ناحیه باعث افزایش مرزهای سه فازی (شکل ۱-۴) و در نتیجه بهبود کارکرد پیل خواهد شد.



شکل ۱-۴ مرزهای ۳ فازی یا TPB [7]

۳-۲-۱) آند

آند نیز می‌بایست بیشتر ویژگی‌های کاتد مانند تخلخل، هدایت الکتریکی و سازگاری شیمیایی و مکانیکی را دارا باشد. همچون کاتد، برای گسترده کردن مرزهای میان سه فاز مختلف، آند نیز باید تا حدی ویژگی رسانش یونی را داشته باشد. الکتروود آند پیل سوختی اکسید جامد در اصل باید نیازهای مختلفی را برآورده کند که عبارتند از:

- ۱) باید نقش کاتالیزوری داشته باشد.
- ۲) باید هادی الکترون‌ها باشد.
- ۳) باید ضریب انبساط حرارتی آن با ضریب انبساط حرارتی سایر اجزاء مطابقت داشته باشد.
- ۴) باید از نظر مکانیکی پایدار باشد.
- ۵) باید واکنش دهنده‌ها و محصولات را به/از مرز سه فازی منتقل کند.

متأسفانه هیچکدام از مواد موجود برای الکتروود آند تمام این نیازها را برآورده نمی‌کند. معمولاً جنس بیشتر الکتروودهای آند از Ni/YSZ می‌باشد. زیرکونیم به منظور جلوگیری از رسوب اجزای فلزی به کار گرفته

می‌شود و ضریب انبساط حرارتی متشابه با الکترولیت ایجاد می‌کند. الکتروود آند تخلخل زیادی دارد (٪ ۴۰-۲۰) بنابراین از انتقال جرم گازهای واکنش‌دهنده و محصول جلوگیری نمی‌شود. در سطح مشترک بین الکترولیت و الکتروود آند مقداری تلفات پلاریزاسیون اهمی وجود دارد لذا به منظور کاهش تلفات، الکتروود آند را به صورت لایه لایه در نظر می‌گیرند. اغلب مقداری CeO_2 به سرامیک آند اضافه می‌شود. با این کار تحمل الکتروود آند در برابر سیکل دمایی محیط اکسایشی و کاهشی بهبود می‌یابد. کنترل اندازه ذره YSZ نیز می‌تواند به بهبود پایداری الکتروود آند تحت شرایط کاهشی و اکسایشی کمک نماید [4] [3].

۴-۲-۱) اتصال‌دهنده خارجی^۱

اتصال‌دهنده به عنوان تماس الکتریکی بین الکتروود آند یک پیل منفرد به الکتروود کاتد پیل مجاور و همچنین به عنوان مانع فیزیکی برای محافظت از الکتروودهای کاتد/آند یک پیل منفرد از محیط اکسایشی/کاهشی کانال سوخت/هوا پیل مجاور به کار می‌رود. بنابراین مواد اتصال‌دهنده باید در محیط‌های اکسایشی و کاهشی پایدار باشند. مواد اتصال‌دهنده بر هزینه‌های استک پیل سوختی با توجه به دمای کاری، به طور چشمگیری تأثیر دارد. ماده اتصال‌دهنده رایج از جنس پایه پایدار شده با آلیاژهای مقاوم در محیط اکسایشی دما بالا می‌باشد. در مقایسه با اتصال‌دهنده‌های از جنس سرامیک، اتصال‌دهنده‌های فلزی دارای هدایت الکترونی بالایی بوده و ارزانتر هستند. با این وجود هدایت الکترونی به فرایند پوشش‌دهی و میزان پوشش بستگی دارد. مواد خیلی رایج برای پایدار کردن کرومات لانتانیوم، استرانتیوم و کلسیم می‌باشند. در دماهای کاری بالا، اتصال‌دهنده‌های از جنس فلز مانند آلیاژهای پایه آهن و پایه نیکل به آسانی اکسید می‌شوند.

صفحات اتصال‌دهنده دارای وظایف زیر می‌باشند:

- ۱) انتقال جریان: با قرار گرفتن بر روی الکتروود آند جریان به آن انتقال می‌یابد و از سطح پیل خارج می‌شود. همچنین با قرار گرفتن بر روی الکتروود کاتد، جریان را به آن انتقال می‌دهد.
- ۲) انتقال گاز: با قرار گرفتن اتصال‌دهنده بر روی الکتروود آند و از طریق کانال‌هایی که بر روی آن وجود دارد سوخت بر روی الکتروود آند دمیده می‌شود و به داخل حفره‌های آن نفوذ می‌کند و واکنش انجام می‌شود. بر روی الکتروود کاتد نیز اکسیژن دمیده می‌شود و داخل آن نفوذ می‌کند.

از آنجایی که گاز در دمای بالا دمیده می‌شود و الکتروودهای آند و کاتد نیز به دلیل انجام واکنش در دمای بالایی قرار دارند، ماده اتصال‌دهنده باید از جنس سرامیک باشد. جدول ۲ انواع مواد اتصال‌دهنده را بر پایه YCrO_3 و YCr_2O_3 به همراه ضریب انبساط حرارتی نشان می‌دهد [4].

¹ Interconnect

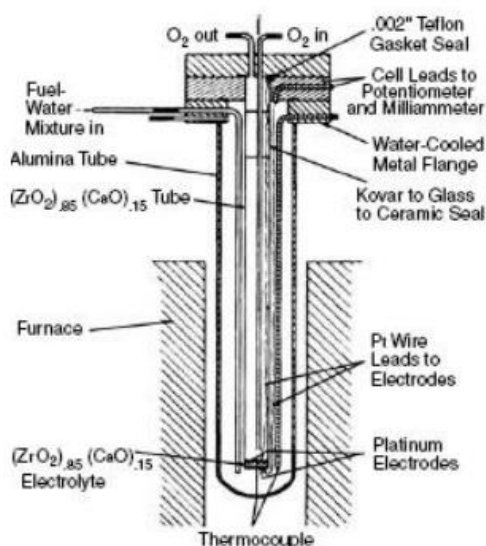
جدول ۲ انواع مواد اتصال دهنده بر پایه و و میزان رسانایی آن‌ها بر حسب دما [5]

ترکیب شیمیایی	ضریب انبساط حرارتی ($\times 10^{-6}/K$)
LaCrO_3	9.5
$\text{LaCr}_{0.9}\text{Mg}_{0.3}\text{O}_3$	9.5
$\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{O}_3$	10.7
$\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{O}_3$	11.1
$\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{O}_3$	10.8
$\text{LaCr}_{0.9}\text{Co}_{0.3}\text{O}_3$	13.1
$\text{La}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Cr}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{Mg}_{0.3}\text{O}_3$	11.1
YCrO_3	7.8
$\text{Y}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{CrO}_3$	8.9
$\text{Y}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{CrO}_3$	9.6
YSZ	9.4–11

۳-۱) تاریخچه پیل سوختی اکسید جامد

پیل سوختی اکسید جامد تقریباً از ۱۰۰ سال قبل به کار برده شده است. تحقیقات بر روی پیل سوختی اکسید جامد از دهه ۱۹۳۰ با کارهای بور و پریس که نشأت گرفته از کشف تحسین برانگیز رسانایی یونی بود، آغاز شد. به هر حال این نوع از پیل سوختی تنها توجهات را تا دهه ۱۹۷۰ به خود جلب کرد. به نظر می‌رسید این طرح پتانسیل بالایی برای تولید الکتریسیته با راندمان بالا تا حدود ۷۰٪ و ۹۰٪ را در مواقع ترکیب با توربین‌های گازی دارد ولی با توجه به هزینه‌های ساخت بالا و ارزان‌تر بودن استفاده از سوخت‌های فسیلی، توانایی رقابت با نیروگاه‌هایی که از سوخت فسیلی استفاده می‌کردند را نداشت [2].

بور و پریس براساس نیاز به الکترولیتی با قابلیت کنترل بیشتر نسبت به الکترولیت‌های مذاب، پیل سوختی اکسید جامد را توسعه دادند. آنها از جزئی جامد که توسط ویلهلم نرنست در سال ۱۸۹۹ گسترش یافته بود استفاده کردند. یک الکترولیت مشابه براساس زیرکونیوم توسط ویسبارت و روکا در سال ۱۹۶۲ در شرکت الکترونیکی وستینگ هوس استفاده شده بود. آنها در این شرکت پیل سوختی ساختند که در الکترولیت آن ZrO_2 ۸۵٪ و CaO ۱۵٪ وجود داشت و از پلاتینیوم متخلخل به عنوان الکترود استفاده شد. این پیل مساحت ۲٫۵ سانتی‌متر مربعی و ضخامت ۰٫۱۵ سانتی‌متری داشت و کاملاً نزدیک به انتهای یک لوله هم‌جنس الکترولیت جایگذاری شده بود [8].



شکل ۱-۵ پیل سوختی وایسبارت و روکا در شرکت وستینگ‌هاوس الکتریک سال ۱۹۶۲ [8]

روشن است که تلاش‌های صورت گرفته برای بهبود راندمان و عملکرد پیل سوختی اکسید جامد روندی را دنبال کرده که بیشتر بر استفاده از جنس‌های مختلف در الکترودها و الکترولیت و پارامترهای هندسی پیل تمرکز داشته است.

۴-۱) نمونه‌های SOFC ساخته شده در دنیا

شرکت‌های متعددی در سرتاسر دنیا به توسعه سیستم‌های SOFC مشغول هستند. اکثریت این شرکت‌ها در:

۱) آمریکای شمالی (Bloom Energy (USA), FuelCell Energy (USA), ...)

۲) اروپا (Adelan (UK), Bosch Thermotechnology (Germany),...)

۳) آسیا (Aisin-seiki (Japan), G-cell Technology (China),...) می‌باشند [9].

در ادامه به معرفی تعدادی از این شرکت‌ها می‌پردازیم.

در ژاپن یک پروژه تحقیقاتی در زمینه‌ی SOFC ها توسط ^۱NEDO و ^۲NEF در طول سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ صورت گرفت. در این پروژه ۲۳۳ سیستم SOFC در مکان‌های مختلف نصب و اطلاعات متنوع عملکرد این سیستم‌ها جمع‌آوری و بررسی گردید. طبق این تحقیقات آن‌ها نشان دادند که سیستم SOFC مسکونی در صرفه‌جویی مصرف انرژی اولیه و انتشار گازهای گلخانه‌ای CO₂ موثر باشد. بعد از این تحقیقات، شرکت‌های JX Nippon Oil & Energy Corporation و Aisin شروع به ساخت سیستم‌های SOFC CHP (ترکیب تولید توان و گرما) به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ کردند.

شرکت AISIN در ژاپن در ساخت انواع محصولات پیل سوخت فعالیت می‌نماید که در ذیل (شکل ۱-۶) یکی از محصولات این شرکت آورده شده است:



Manufacturing company	③ Aisin (SOFC)
Fuel	NG
Rated output power	700 W
Power generation Efficiency(LHV)	46.5 %
Heat recovery Efficiency (LHV)	43.5 %
Size of FC unit	600W × 935H × 335D
HW Tank volume	90 L

شکل ۱-۶ پیل سوختی اکسید جامد ساخته شده توسط Aisin [10]

¹ New Energy and Industrial Technology Development Organization

² New Energy Foundation

شرکت KYOCERA مجموعه فعال در تولید صنعتی این محصول می‌باشد. در ذیل (شکل ۷-۱) محصول این شرکت به صورت مختصر معرفی می‌گردد:



Power generation unit

Specifications

Rated Output of Power Generation (AC)	3kW
Rated Power Generation Efficiency	52.0% (LHV, default)
Rated Overall Efficiency	90% (LHV, default)
Dimensions	1,150 W × 675 D × 1,690 H (mm)
Weight	375 kg
Gas type	City gas (13A)

* A hot water storage unit (200L) separately sold by Noritz Corporation is also required.

شکل ۷-۱ پیل سوختی اکسید جامد ساخته شده توسط Kyocera [11]

	Toshiba	Panasonic	Aisin Seiki
Model			
Output	700 W (PEM)	700 W (PEM)	700 W (SOFC)
Size (mm)	W780 x D300 x H1000	H1750 x W400 x D400	W780 x D330x H1195
Weight	86 kg	88 kg	100 kg
Electrical Efficiency	39 %	39 %	52 % @700W
Hot water tank Capacity	200L	140L	28 Litters
Retail Price (list price) (excl. tax (8%))	¥ 1,630,000 (excl. installation)	¥ 1,600,000 - (excl. installation)	¥ 1,785,000 (excl. installation)

شکل ۸-۱ مقایسه سه نوع محصول متفاوت از سه شرکت متفاوت [12]

مقایسه تعدادی از محصولات SOFC از شرکت‌های مختلف در شکل ۹-۱ نشان داده شده است، که بیشترین بازده را پیل‌های سوختی شرکت Bloom Energy دارد.

Manufacturer	Denso	Miura	Fuji Electric	Hitachi Zosen	Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPS)	(Reference) Bloom Energy
	Demonstration model					Business model
Appearance						
Output	5 kW	5 kW	20 kW	50 kW	250 kW	200 kW
Type	Cogeneration (under consideration)	Cogeneration	Cogeneration (under consideration)	Cogeneration	Cogeneration	Mono-generation
Electrical generation efficiency (target value)	50 %	50 %	50 %	50 %	55 %	50 – 60 % (Actual performance)
Total efficiency (target value)	(under consideration)	90 %	(under consideration)	80 %	73% (hot water) 65% (steam)	–
Major envisioned demand	Barbers and hair salons, small stores, family restaurants		Gym, welfare facilities, hospitals, small buildings		Data centers, large buildings, and hotels	

شکل ۹-۱ مقایسه پیل‌های سوختی شرکت‌های مختلف [13]

مزایا پیل سوختی اکسید جامد

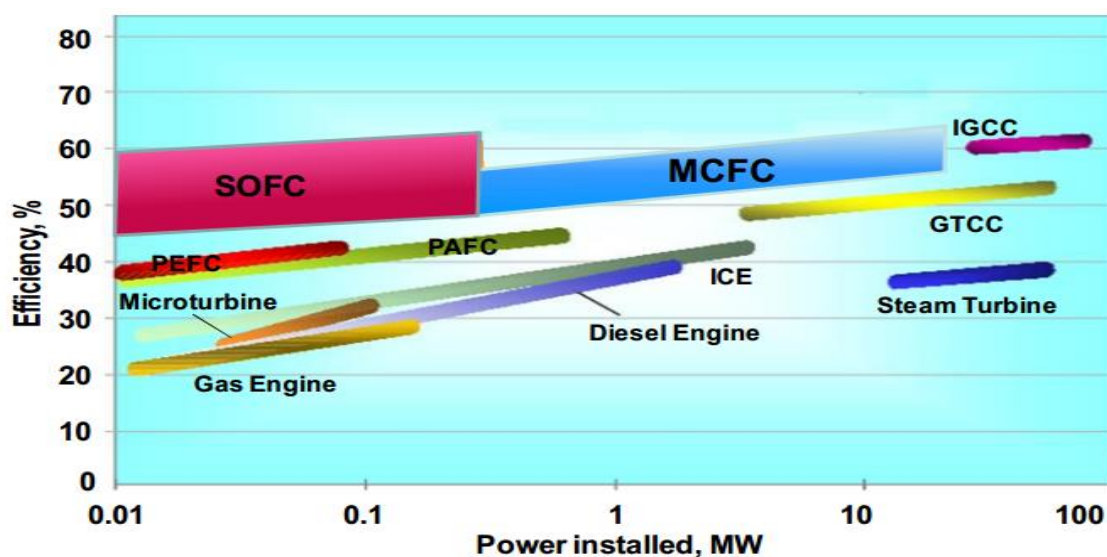
(۲-۱) مقدمه

پیل سوختی اکسید جامد یک تکنولوژی پیشرفته برای تبدیل انرژی شیمیایی در سوخت‌های هیدروکربن به انرژی الکتریکی و گرمایش با استفاده از یک واکنش الکترو شیمیایی است. تکنولوژی SOFC دارای مزایای زیادی نسبت به تکنولوژی‌های احتراقی می‌باشد، از جمله:

- راندمان بالا، از جمله در مقیاس کوچک
- انعطاف‌پذیری سوخت
- کاهش انتشار آلاینده‌های خروجی (CO_2 , NO_x , SO_x)
- عملکرد بدون صدا و عدم لرزش

(۲-۲) راندمان

پیل سوختی اکسید جامد از تکنولوژی‌های متداول مانند موتورهای احتراق و توربین‌های گازی متفاوت است و دارای مراحل احتراق و تبدیل حرارت به کار مکانیکی به منظور تولید تولید الکتریسیته نیست و مستقیم به وسیله استفاده از واکنش‌های شیمیایی برق تولید می‌کند.



IGCC	Interated gasification combined cycle
PEFC	polymer electrolyte fuel cell
MCFC	molten carbonate fuel cell
SOFC	solid oxide fuel cell
ICE	internal combustion engine
PAFC	phosphoric acid fuel cell

شکل ۱-۲ مقایسه پیل سوختی جامد و سایر سیستم‌های تولید توان [14]

۳-۲) انعطاف‌پذیری در سوخت

پیل سوختی اساساً وسیله‌ای است که سوخت (مانند هیدروژن، متانول، گاز طبیعی، بنزین و...) و اکسیدان (مانند هوا و اکسیژن) را به برق، آب و حرارت تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر پیل سوختی شبیه یک باتری بوده ولی بر خلاف باتری نیاز به انبارش (شارژ) ندارد. تا زمانی که سوخت و هوای مورد نیاز پیل تأمین شود، سیستم کار خواهد کرد. پیل‌های سوختی می‌توانند سوخت‌های حاوی هیدروژن مانند متانول (Methanol)، اتانول (Ethanol)، گاز طبیعی (Natural Gas) و حتی بنزین و گازوئیل را مورد استفاده قرار دهند. بطور کلی در سوخت‌های هیدروکربوری، هیدروژن توسط یک دستگاه اصلاحگر سوخت (Fuel Reformer)، از آن‌ها جدا شده و بکار گرفته می‌شود. با توجه به دمای عملکرد بالای SOFC (۶۰۰-۹۰۰) درجه سانتی‌گراد، هیدروکربن‌های با وزن مولکولی پایین، می‌توانند بدون نیاز به اصلاح‌کننده (Reformer) بیرونی، اصلاح (Reform) گردند. با تهویه مناسب، به منظور حذف آلاینده‌های مضر و اطمینان از تعادل مناسب ترکیبات کربن، می‌توان از سوخت‌های گوناگون نظیر (گاز طبیعی، بیوگاز، اتانول، متانول، پروپان و حتی سوخت موشک نیز استفاده کرد. سوخت‌های مایع غیرکربن مایع مانند آمونیاک و هیدرازین نیز می‌توانند در SOFC استفاده شوند. آمونیاک با توجه به ارزان بودن، ذخیره‌سازی آسان، داشتن چگالی انرژی بالا بدون تولید دی‌اکسید کربن بسیار مورد توجه است.

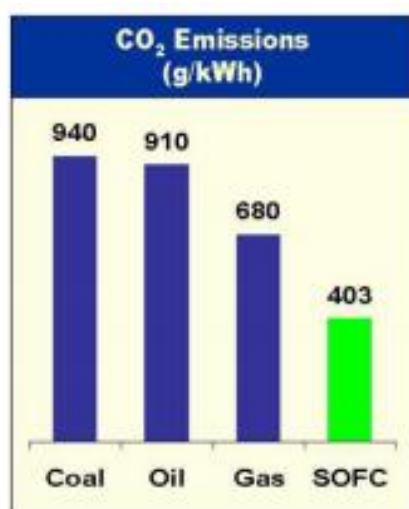
۴-۲) آلاینده‌های خروجی از پیل سوختی جامد

سیستم‌های پیل سوختی برای فرآیند تولید توان نیازی به احتراق ندارند، به همین دلیل تولید گازهای گلخانه‌ای از جمله NO_x یا ذرات ریز دیگر، از این سیستم‌ها کم است. به علاوه، ترکیبات گوگرد برای پیل سوختی، سمی هستند که باید از سوخت استخراج گردند بنابراین SO_x خروجی از پیل ناچیز می‌گردد. در جدول ۴ میزان آلاینده‌های خروجی از پیل سوختی اکسید جامد را نشان می‌دهد [15].

جدول ۴: آلاینده‌های خروجی پیل سوختی اکسید جامد [15]

Emissions Characteristics	System
Fuel Cell Type	SOFC
Nominal Electricity Capacity (kW)	1.5
NO_x (lb/MWh)	Negligible
SO_x (lb/MWh)	Negligible
CO (lb/MWh)	Negligible
VOC (lb/MWh)	Negligible
CO_2 (lb/MWh)	734
CO_2 with heat recovery (lb/MWh)	555

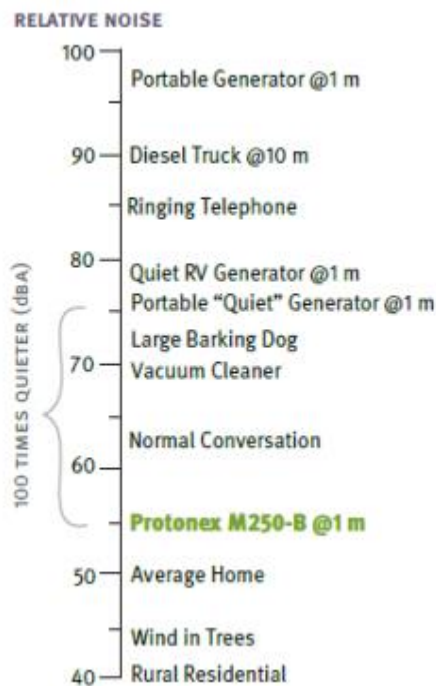
اگر سوخت از منابع تجدیدپذیر (مانند بایوگاز) تهیه شود، عملکرد پیل سوختی اکسید جامد تمیزتر و خالص‌تر می‌شود. در شکل ۲-۲ به مقایسه تولید منواکسید کربن در سیستم‌های احتراقی و پیل سوختی پرداخته شده است.



شکل ۲-۲ مقایسه تولید CO₂ خروجی از سیستم‌های Combustion و SOFC [15]

۲-۵) آلودگی صوتی :

تبدیل الکتروشیمیایی سوخت نیاز به بخش‌های متحرک برای تولید توان را از بین می‌برد. سیستم‌های پیل سوختی فاقد اجزای متحرک هستند. با توجه به این ویژگی سیستم پیل سوختی اکسید جامد دارای ارتعاش و سروصدا نیستند که یک ویژگی مطلوب در فضاهای باز و بسته است.

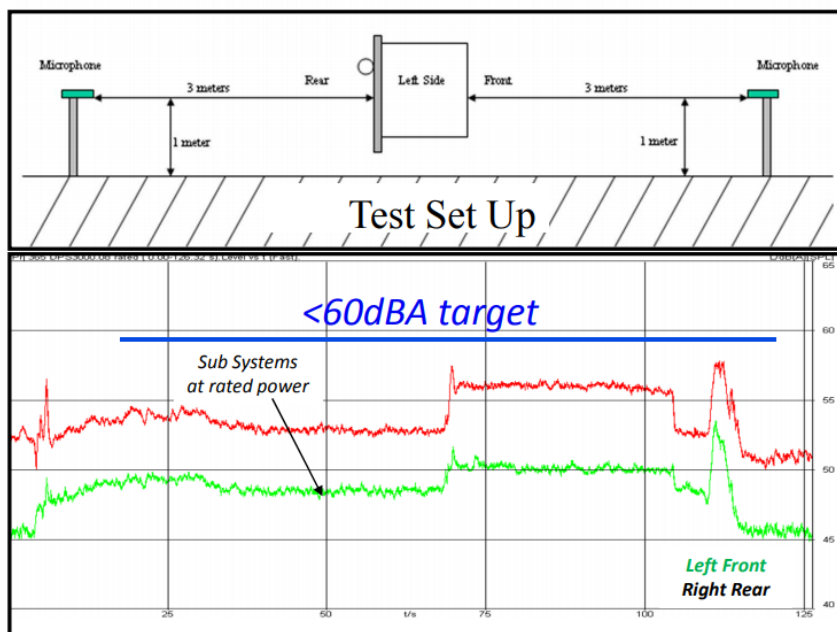


حذف صدا و ارتعاش از یک سیستم پیل سوختی کوچک ممکن تا حدی صورت بگیرد که شما صدای آن را در حال صحبت نشنوید.

شکل ۳-۲ صدای نسبی میان پیل سوختی (Protonex) و سیستم های مختلف

[15]

- ◆ Delphi's SOFC APU is quieter than current diesel gensets



Relative Noise Levels

- ◆ Snowmobile (100dBA)
- ◆ Telephone Dial Tone (80dBA)
- ◆ Current Diesel Gen Set APU (75-80dBA)
- ◆ Normal Conversation (60-70dBA)
- ◆ **Delphi SOFC APU (60dBA)**
- ◆ Whisper Quiet Library (30dBA)

Increasing Noise Level

DELPHI

شکل ۴-۲ سطوح صدای نسبی میان پیل سوختی (Delphi) و سیستم های مختلف [16]

۶-۲) طول عمر

در مقایسه با سایر پیل‌های سوختی، SOFC ها به طور کلی بهترین پایداری و قابلیت اطمینان را به علت ساختار سرامیکی تمام جامد ارائه می دهند.

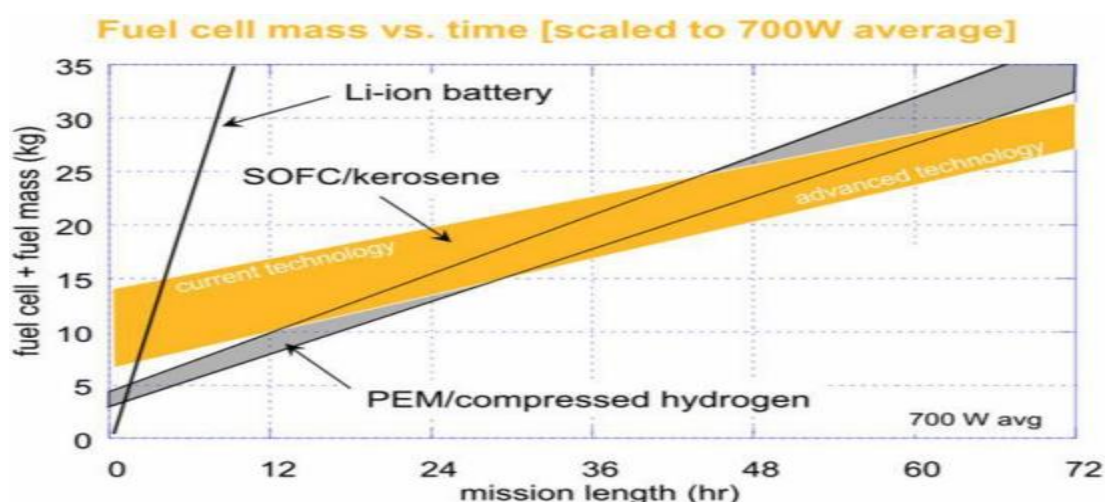
سیستم‌های تجاری SOFC در حال حاضر عمر ۳۰,۰۰۰ تا ۴۰,۰۰۰ ساعت یا تقریباً چهار سال با در نظر گرفتن کارکرد مداوم دارا می باشند، هرچند که واحد‌های آزمایش عملکرد قابل قبولی برای بیش از ۱۰ سال را نیز نشان داده اند.

کمیسیون اروپایی پیل سوختی و هیدروژن (FCHJU) معتقدند که پیل‌های سلولی سوختی باید حداقل ۱۰ سال عمر کنند تا تقاضای تجاری را رعایت کنند. دستیابی به این عمر نیازمند بهبود طول عمر مواد مورد استفاده می باشد.

دماهای بالا باعث افزایش سرعت خوردگی و تخریب اجزاء سلول در طول زمان می شود، بنابراین کاهش دمای عملیاتی برای کاهش این فرآیند و افزایش عمر حیاتی و ضروری است. بهینه سازی طراحی مواد و بهبود روش های حرارتی که برای سخت کردن مواد به جهت بهبود دوام نیز استفاده می شود نیز نقش مهمی دارد. در فصل آینده بحث بیشتری در مورد نحوه و بهینه سازی روش‌های ساخت شده است.

۷-۲) وزن

یکی از مزایای پیل سوختی در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های موجود و حتی سایر پیل سوختی وزن کم این سیستم است. در شکل ۲-۵ وزن سه نوع تکنولوژی (Battery, SOFC, PEM) در طول کارکرد نشان داده شده است. با توجه به وزن کم SOFC می توان از این سیستم در صنایع هوایی نیز استفاده کرد.



شکل ۲-۵ وزن سه نوع سیستم (Battery, SOFC, PEM) [15]

۸-۲) حوزه‌های کاربرد

از آنجایی که سیستم‌های SOFC می‌توانند به هر مقیاس بین چند وات تا چند صد کیلووات ساخته شوند، می‌توانند در انواع مختلف برنامه‌های کاربردی استفاده شوند، می‌توان این کاربردها را دسته‌بندی کرد که عبارتند از:

- موبایل، نظامی و استراتژیک (>۱ کیلو وات)
- توان کمکی (APU) و قدرت پشتیبان (۱-۲۵۰ کیلو وات)
- گرمای و توان ترکیبی ثابت در مقیاس کوچک (m-CHP) (۱-۵ کیلو وات)
- مقیاس متوسط-بزرگ ثابت (۱, ۰-۱۰ MW).

برای هر یک از این زمینه‌های کاربردی، در حال حاضر توسعه‌دهندگان صنعتی در تلاش برای ورود به بازار، کسب تجربه هستند. این فعالیت بسیار ضروری است تا شکاف بین SOFC و فن‌آوری‌های متعارف مورد استفاده در این زمینه، به ویژه از لحاظ استحکام، هزینه و آشنایی با مصرف‌کنندگان، ایجاد شود. به همین دلیل برای هر یک از زمینه‌های کاربردی ذکر شده، یک مرور کلی از این کاربردها ارائه شده است.

۸-۲-۱) موبایل، نظامی و استراتژیک

یکی از نگرانی‌های عمده امروز در زمینه انرژی نیازهای سخت برای برنامه‌های کاربردی تلفن همراه (کمتر از ۱ کیلووات)، به ویژه در زمینه دفاع نظامی و شناسایی استراتژیک، است که توسط پیل سوختی SOFC برطرف شده است. از همه مهم‌تر وزن و حجم کاهش یافته با تراکم قدرت بالا و همچنین قابلیت اطمینان، ویژگی‌های مورد نیاز بوده که توسط پیل سوختی اکسید جامد برطرف شده است.

در شکل ۶-۲ یک سیستم بدون سرنشین iRobot PackBot UGV AM نشان داده شده است. این سیستم ۱۲ ساعت عملکرد (۴۰ مایل) را دارد، در حالی که در سیستم‌های با باتری استاندارد ۵.۲ ساعت عملکرد (۸ مایل) را می‌تواند داشته باشد.



شکل ۶-۲ سیستم بدون سرنشین iRobot PackBot UGV AM [15]

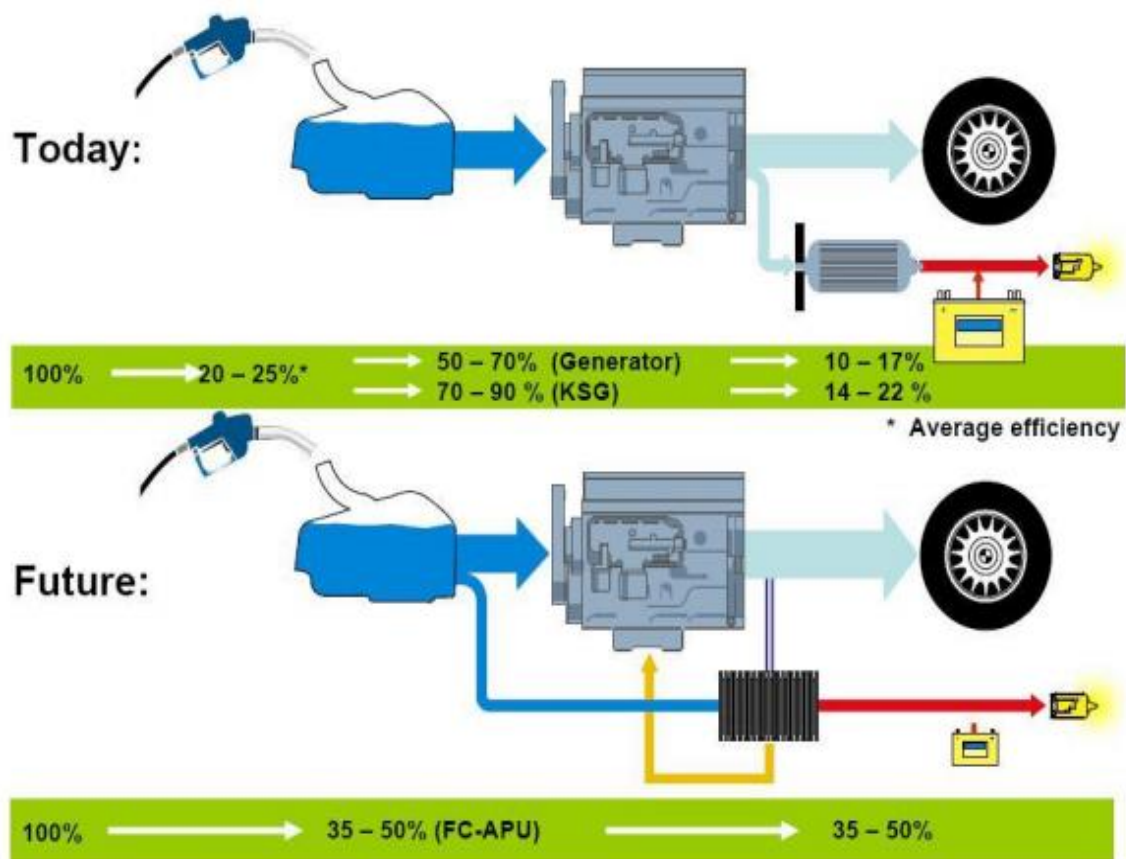
۲-۸-۲) توان کمکی (APU)

SOFC ها همچنین می‌توانند در سیستم‌های قدرت کمکی (APU) برای تولید توان در هر نوع وسایل نقلیه استفاده شوند. محدوده اصلی برای کاربرد این سیستم، تامین الکتریسیته است. یک APU مبتنی بر SOFC باعث بهبود کارایی تولید برق در حین عملکرد وسیله نقلیه می‌شود.

در شکل‌های ۷-۲ و ۷-۳ یک کامیون ساخته شده بر اساس APU و شماتیکی از مقایسه راندمان بین سیستم‌های تولید توان مرسوم و SOFC APU به ترتیب نشان داده شده است. راندمان تولید الکتریسته در وسایل نقلیه (استفاده از ژنراتورهای مرسوم کوپل شده با موتور) در حدود ۱۰ تا ۱۵٪ می‌باشد، در حالی که مجموع راندمان سیستم‌های SOFC APU به بالای ۳۰٪ می‌تواند برسد که بیشتر از ۲ برابر توان تولیدی با همان مقدار سوخت است.



شکل ۷-۲ یک مدل از APU شرکت Delphi [15]

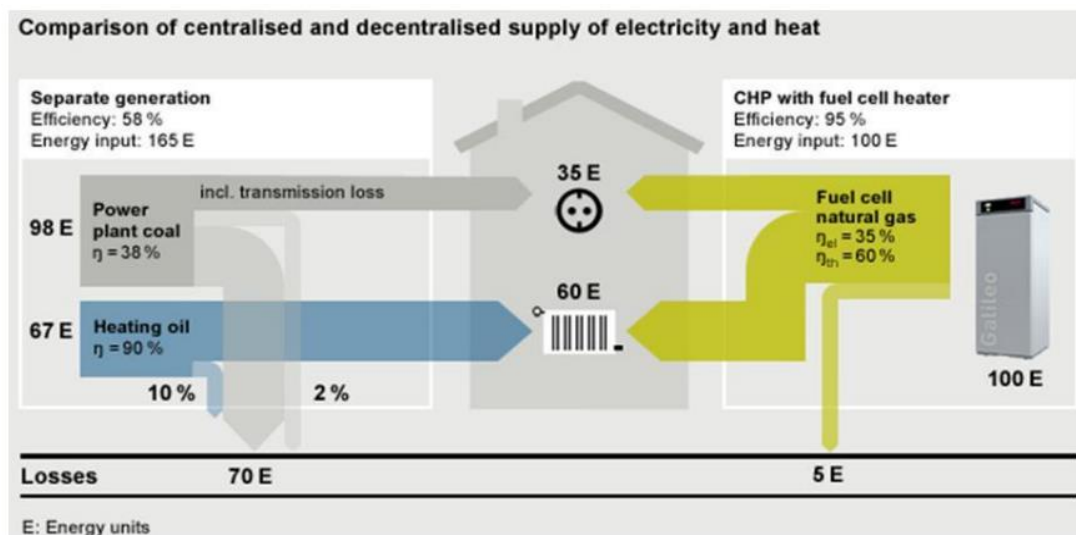


شکل ۲-۸ مقایسه سیستم‌های تولید مرسوم و SOFC APU [15]

۲-۸-۳) گرما و قدرت ترکیبی در مقیاس کوچک (m-CHP)

نیروگاه‌های (power plants) کوچک ثابت (۵ تا ۵ کیلو وات) معمولاً به عنوان میکرو CHP نامیده می‌شوند که در مقیاس مسکونی برای استفاده ترکیبی گرما و برق است. پتانسیل بزرگی از این برنامه در این واقعیت است که هر دو برق و گرما برای یک خانواده می‌تواند، از یک منبع واحد اصلی انرژی مانند گاز طبیعی یا گاز طبیعی تولید شود.

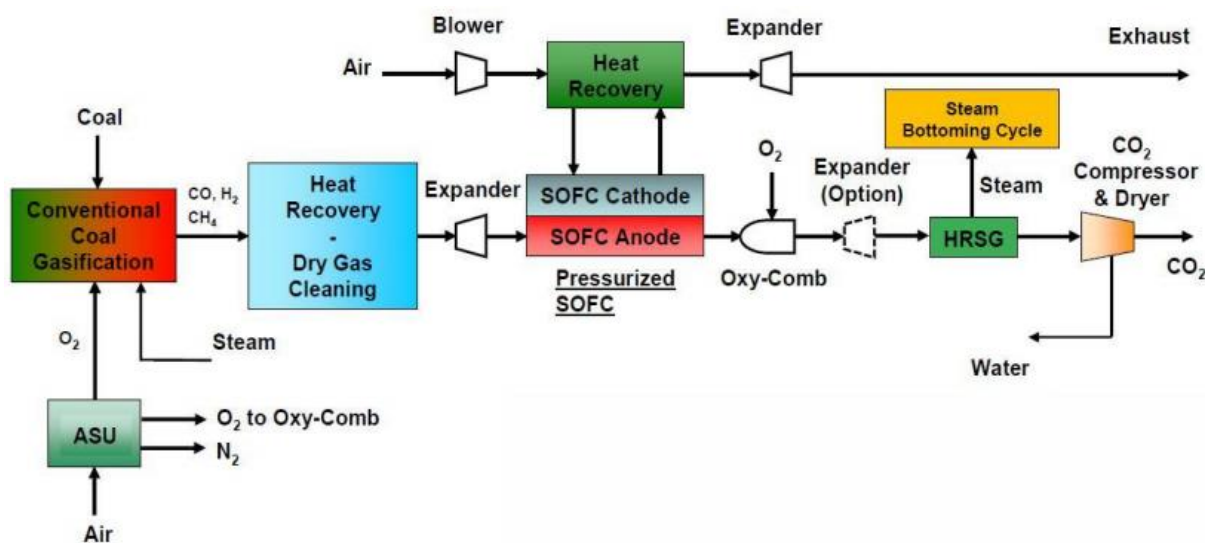
در شکل ۲-۹ مقایسه بین سیستم‌های CHP با گرمایش پیل سوختی و سیستم معمولی برای گرمایش یک محل مسکونی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار قابل توجهی از انرژی اولیه ورودی را با تولید توان ذخیره شود و از گرمای اضافی برای اهداف گرمایش استفاده گردد.



شکل ۹-۲ مقایسه بین سیستم‌های CHP با گرمایش پیل سوختی و سیستم معمولی [15]

۴-۸-۲) مقیاس متوسط-بزرگ

برق را می‌توان در مسافت‌های طولانی بدون کاهش توان منتقل کرد، اما گرما را نمی‌توان به طور موثر از نقطه تولید، منتقل کرد. به منظور استفاده از گرما تولید شده، نیروگاه‌ها باید کوچکتر، پراکنده و در نزدیکی کاربران نهایی قرار گیرند. با این حال، نیروگاه‌های مرسوم را نمی‌توان بدون کاهش راندمان در مقیاس کوچک برد، و همچنین تاثیر منفی یک کارخانه مبتنی بر احتراق در نزدیکی حوضه کاربر نهایی مطلوب نیست. سیستم‌های تولید متوسط مبتنی بر SOFC (در محدوده صدها و هزاران کیلووات) این اشکالات را ندارند و می‌توانند به‌طور موثر گرما و برق را در «مقیاس محله» و همچنین مراکز دیگری به صورت مستقل استفاده کرد.



شکل ۱۰-۲ سیستم SEAC با بازده ۵۰٪ [15]

مقایسه پیل‌ها و سیستم‌های تولید توان

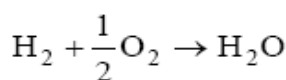
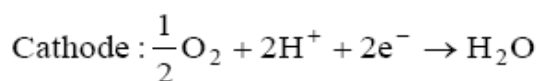
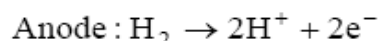
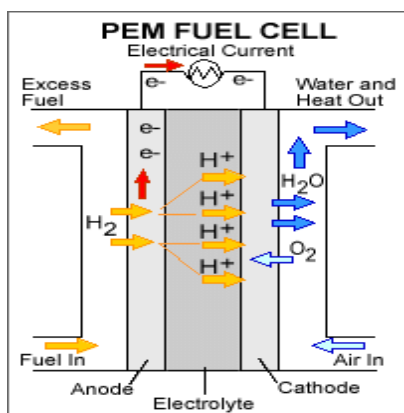
۳-۱) انواع پیل سوختی

پیل‌های سوختی به دلیل راندمان بالا، عدم انتشار آلاینده‌های زیست محیطی، چگالی توان بالا، عدم وجود قطعات متحرک و عدم ایجاد ارتعاش و صدا، تجهیزات مطلوبی برای تولید انرژی از ظرفیت‌های بسیار کم تا نیروگاه‌های بسیار بزرگ به حساب می‌آیند [3]. پیل سوختی نوعی پیل الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی حاصل از واکنش را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سازه و بدنه اصلی پیل سوختی از الکترولیت، آند و کاتد تشکیل شده است. پیل سوختی یک دستگاه تبدیل انرژی است که به لحاظ نظری تا زمانی که ماده اکسیدکننده و سوخت در الکترودهای آن تأمین شود، قابلیت تولید انرژی الکتریکی را دارد. البته در عمل، استهلاک و خوردگی عمر پیل سوختی را کاهش می‌دهد. پیل‌های سوختی را در حالت کلی می‌توان در شش دسته‌ی زیر طبقه‌بندی نمود:

- ۱) پیل سوختی پلیمری
- ۲) پیل سوختی قلیایی
- ۳) پیل سوختی اسید فسفریک
- ۴) پیل سوختی کربنات مذاب
- ۵) پیل سوختی متانولی
- ۶) پیل سوختی اکسید جامد

۳-۱-۱) پیل سوختی پلیمری

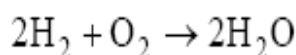
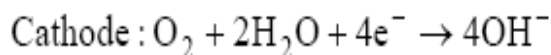
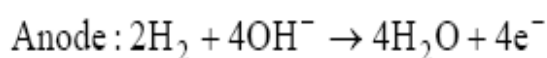
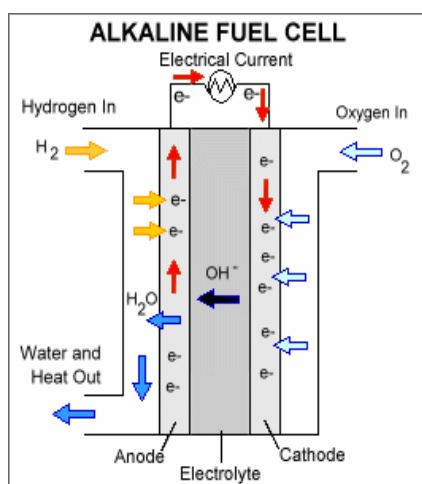
پیل‌های سوختی غشاء پروتون دارای غشاء پلیمری جامد هستند که در حال حاضر عمدتاً غشاء Nafion در این پیل سوختی بکار برده می‌شود. برای سرعت بخشیدن به واکنش، یک کاتالیست پلوتونیومی در دو سطح غشاء الکترولیت استفاده می‌شود.



شکل ۱-۳ پیل سوختی پلیمری و واکنش‌های مربوطه [17]

۳-۱-۲) پیل سوختی قلیایی

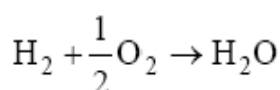
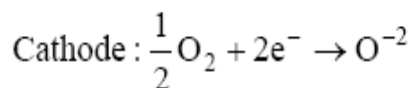
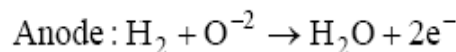
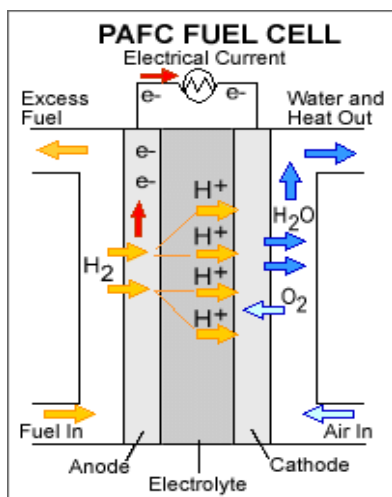
پیل سوختی قلیایی با هیدروژن و اکسیژن خالص کار می‌کند و از محلول هیدروکسید پتاسیم در آب به عنوان الکترولیت استفاده می‌کنند. درجه حرارت کارکرد، بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.



شکل ۳-۲ پیل سوختی قلیایی و واکنش‌های مربوطه [17]

۳-۱-۳) پیل سوختی اسید فسفریک

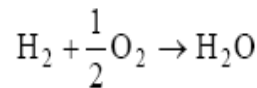
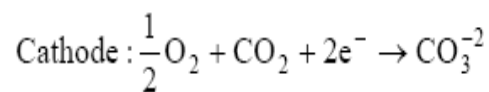
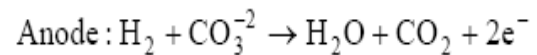
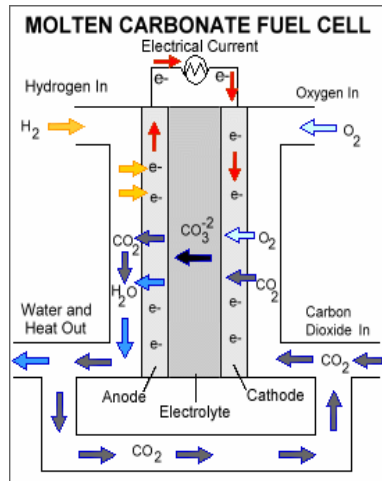
پیل سوختی اسید فسفریک در دمای حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کند و از الکترولیت اسید فسفریک استفاده می‌کند که یون‌های هیدروژن مثبت توسط الکترود از آنند به کاتد می‌روند.



شکل ۳-۳ پیل سوختی اسید فسفریک و واکنش‌های مربوطه [17]

۴-۱-۳) پیل سوختی کربنات مذاب

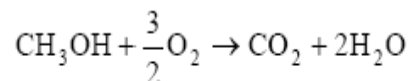
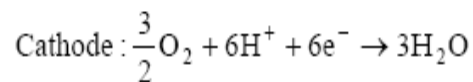
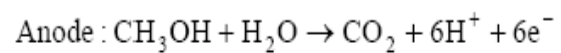
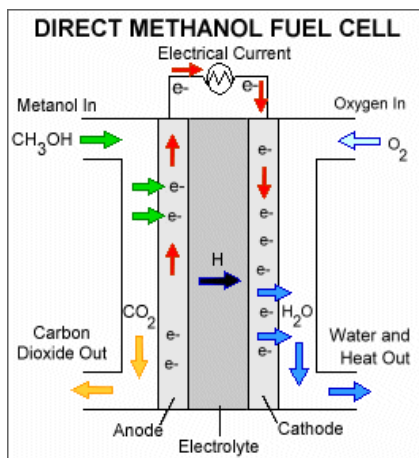
الکترولیت ترکیب ۳۲ درصد کربنات پتاسیم و ۶۸ درصد کربنات لیتیم می‌باشد و الکتروود آن از جنس اکسید نیکل لیتیمی و الکتروود آند از جنس آلیاژ نیکل کروم (۲ تا ۱۰ درصد کروم) است.



شکل ۳-۴ پیل سوختی کربنات مذاب و واکنش‌های مربوطه [17]

۵-۱-۳) پیل سوختی متانولی

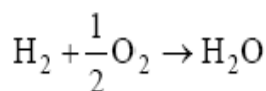
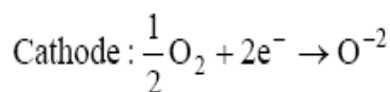
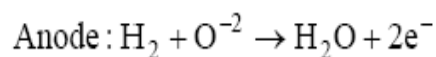
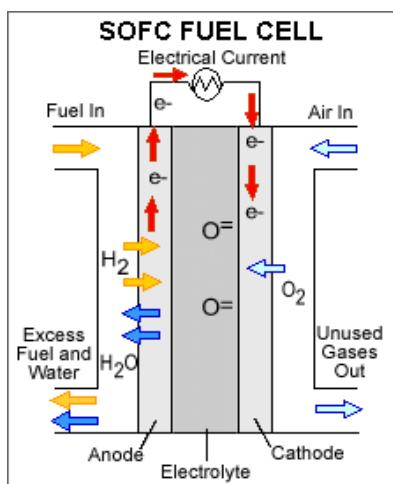
پیل سوختی متانولی در حقیقت یک پیل سوختی پلیمری است که قادر است متانول مایع را مستقیماً بعنوان سوخت مصرف کند. این پیل سوختی در محدوده وسیعی از درجه حرارت کار می‌کند و دمای کارکرد آن بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد است. الکترولیت آن مانند پیل سوختی پلیمری غشاء پلیمری (عمدتاً Nafion) می‌باشد.



شکل ۳-۵ پیل سوختی متانولی و واکنش‌های مربوطه [17]

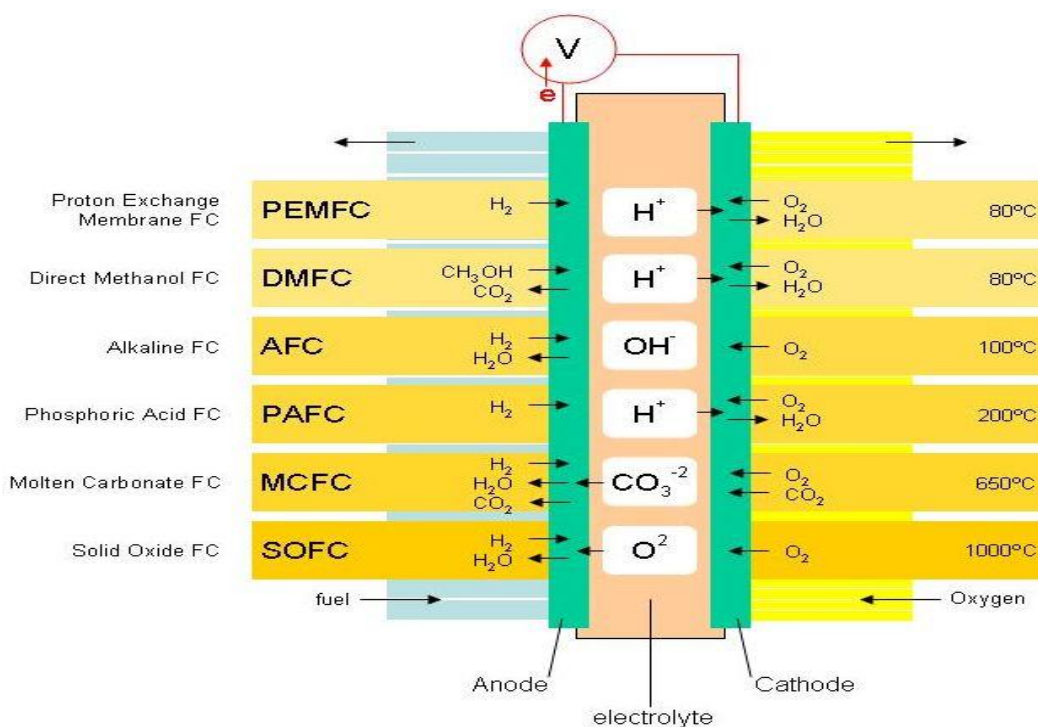
۳-۱-۶ پیل سوختی اکسید جامد

الکترولیت این پیل سوختی سرامیک است و در دمای بالای عملکرد پیل سوختی SOFC، یونهای اکسیژن (با بار منفی) از شبکه کریستالی عبور می‌کند. وقتی یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آن عبور کند، یک جریان شارژ شده منفی شامل یونهای اکسیژن از الکترولیت عبور می‌کند تا سوخت را اکسید کنند.



شکل ۳-۶ پیل سوختی اکسید جامد و واکنش‌های مربوطه [17]

در شکل ۳-۷ به صورت شکاتیک تمامی واکنش‌های صورت گرفته در انواع پیل سوختی مورد نشان داده شده است.



شکل ۳-۷ انواع پیل سوختی در یک مدل [18]

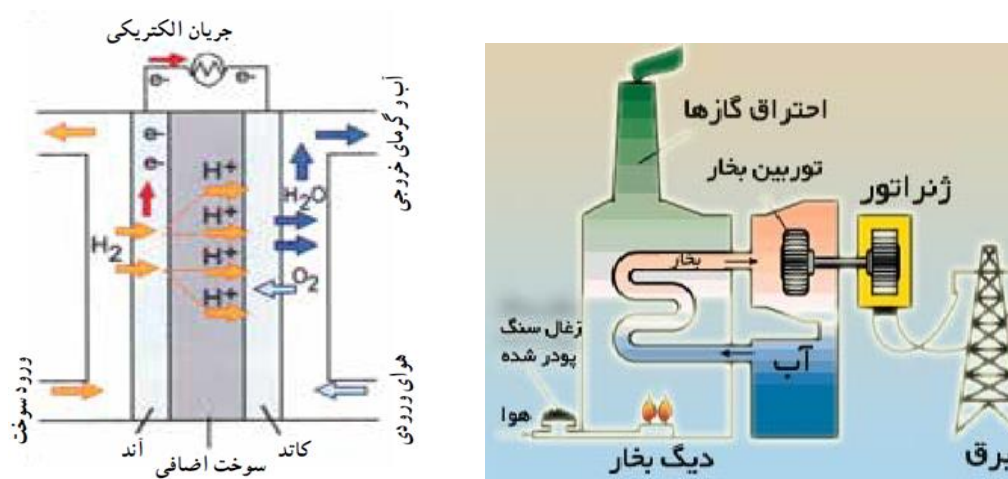
در این بخش به مقایسه‌ی جامع آن‌ها و بررسی مزایا و معایب هر یک می‌پردازیم، که در جدول ۵ زیر قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۵ : مقایسه تمامی مدل‌های پیل سوختی [19]

پارامترها	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	DMFC	SOFC
الکترولیت	Nafion	KOH	اسید فسفریک	کربنات لیتیم و پتاسیم	غشای پلیمری جامد	YSZ
سوخت	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ , CO, CH ₄ و سایر هیدروکربن‌ها	CH ₃ OH	H ₂ , CO, CH ₄ و سایر هیدروکربن‌ها
دمای عملیاتی	۱۰۰-۵۰	۲۰۰-۵۰	۲۰۰	۶۵۰	۲۰۰-۶۰	۱۰۰۰-۸۰۰
دانسیته توان	۶٫۵-۳٫۸	۱	۱٫۹-۰٫۸	۲٫۶-۱٫۵	۰٫۶	۱٫۵-۰٫۱
بازده	٪۶۰-۴۰	٪۶۰-۴۰	٪۴۰-۳۵	٪۶۰-۴۵	٪۴۰	٪۶۵-۵۰
ظرفیت	-۲۵۰kW ۳۰W	۱۰-۱۰۰KW	-۱٫۳MW ۱۰۰KW	-۳MW ۱۵۵KW	۱W-۱MW	-۱٫۷MW ۱KW
هزینه نصب (/KW)	۱۵۰۰>	۱۸۰۰	۲۱۰۰	۳۰۰۰-۲۰۰۰	-	۳۰۰۰
بازیابی حرارتی	-	-	بلی	بلی	خیر	بلی
مزایا	دانسیته توان بالا، شروع به کار سریع،	دانسیته توان بالا، شروع به کار سریع	کاراکترهای الکترولیت ثابت	بازده بالا، عدم نیاز به کاتالیست فلزی	عدم نیاز به ریفرمر	الکترولیت جامد، بازدهی بالا
معایب	کاتالیست پلاتینیوم گران، حساس به ناخالصی‌ها	کاتالیست پلاتینیوم گران، حساس به ناخالصی‌ها	الکترولیت خورنده، حساس به ناخالصی خوراک	هزینه بالا، شروع به کار زمان‌بر، الکترولیت مایع خورنده	دانسیته توان و بازده کم	هزینه بالا، شروع به کار زمان‌بر
مصارف	مسکونی، برق اضطراری، حمل و نقل	حمل و نقل، ایستگاه‌های فضایی، تولید نیرو قابل حمل	تولید نیرو قابل حمل، حمل و نقل، بازیابی حرارتی صنعتی	حمل و نقل، صنعت، واحدهای تولید نیرو	تامین نیرو موبایل و لپ-تایپ	مسکونی (بازیاب-های حرارتی) صنعتی (حمل و نقل)

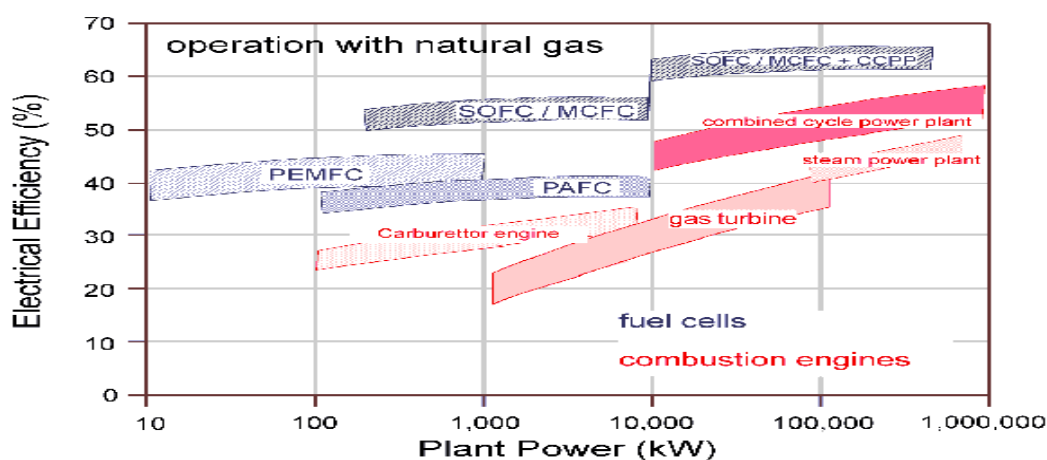
۳-۲) مقایسه روش‌های سنتی تبدیل انرژی با پیل سوختی

پیل سوختی در مقایسه با ژنراتورها که در آن‌ها ابتدا با سوزاندن سوخت انرژی شیمیایی ذخیره شده به گرما و سپس به انرژی مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود، به دلیل حذف سوختن، بازده بالاتری به دست آمده و از آلودگی‌های متداول نیز خبری نیست. نیروگاه‌های گازی متداول دارای معایبی چون استفاده از سوخت‌های فسیلی، راندمان حرارتی پایین، نسبت سوخت مصرفی به توان تولیدی بسیار کم و اتلاف دمای بالای گازهای خروجی از توربین می‌باشند.



شکل ۳-۸ مقایسه پیل سوختی و ژنراتورها [7]

در یک مقایسه کلی میان روش‌های مختلف تولید توان که در شکل ۳-۹ آورده شده است، بازده بالای پیل سوختی اکسید جامد نسبت به سایر منابع کاملاً مشخص می‌باشد.

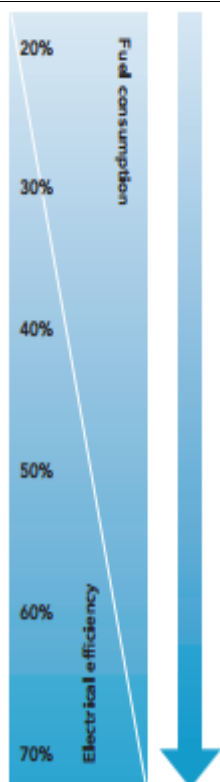


شکل ۳-۹ تولید توان در سیستم‌های مختلف [20]

در جدول ۶ به مقایسه انواع تکنولوژی تبدیل قدرت پرداخته شده است:

جدول ۶ مقایسه انواع تکنولوژی تبدیل قدرت [21]

طول عمر (ساعت)	تکنولوژی تبدیل قدرت
۱۰۰,۰۰۰ +	میکرو توربین‌های گازی، موتورهای دیزلی
۱۰,۰۰۰	پیل سوختی پلیمری
۳۰-۴۰,۰۰۰	پیل سوختی اکسید جامد
۵۰-۶۰,۰۰۰	Elcogen 2 nd gen ASC based SOFC
۹۰,۰۰۰	Elcogen 3 rd gen ASC based SOFC



معمولا ۵۰ تا ۹۰ درصد از سوخت در واکنش الکتروشیمیایی پیل شرکت می‌کند. سوخت خروجی که در واکنش شرکت نکرده در بیرون از پیل می‌سوزد و برای تولید بخار در سیکل‌های ترکیبی قابل استفاده است. کوپلینگ سیستم SOFC به همراه مجموعه توربین گاز می‌تواند بازدهی را تا ۶۵-۷۰٪ افزایش دهد.

در حال حاضر تحقیقات در زمینه ساخت مواد مورد استفاده در سیستم SOFC معطوف شده است. شایان ذکر است به دلیل محدودیت‌های متالورژیکی توسعه‌ی این سیستم‌ها با کندی مواجه شده است. در جدول ۷ ساختارهای موجود از ترکیب پیل سوختی و سایر سیستم‌ها آورده شده است.

ساختار	کاربرد	منبع انرژی	وضعیت توسعه
ریفرمربخار+SOFC+سیکل برایتون و رانکینگ	تولید نیرو، کشتی	گاز طبیعی	مفهومی
تولید ترموشیمیایی هیدروژن+SOFC+سیکل برایتون و هلیوم برایتون	تجهیزات دریایی، تولید نیرو	راکتور هسته‌ای	مفهومی
گازی‌سازی زغال‌سنگ+SOFC+سیکل برایتون و رنکینگ	تولید نیرو	زغال‌سنگ	مفهومی
سیکل برایتون+SOFC	تولید نیروی پراکنده	گاز طبیعی	طرح تایید شده ^۱
SOFC+سیکل برایتون و چنچ	تولید نیروی پراکنده	گاز طبیعی	مفهومی
SOFC+CHP	تولید نیروی پراکنده + ساختمان	گاز طبیعی	طرح تایید شده ^۲
SOFC + سیکل یخچالی	ساختمان	گاز طبیعی	مفهومی
SOFC+ریفرمربنزین	تامین نیروی کمکی برای اتومبیل و هواپیما	بنزین	طرح تایید شده ^۳
SOFC+ریفرمردیزل	تامین نیروی کمکی برای اتومبیل	دیزل	طرح تایید شده ^۴
گازی‌سازی بیومس+SOFC	تولید نیروی پراکنده	بیومس	مفهومی

جدول ۷ ساختارهای موجود از ترکیب پیل سوختی و سایر سیستم‌ها [20]

فرآیندهای ساخت پیل سوختی اکسید جامد

۴-۱) مقدمه

در سراسر جهان پیشرفت‌های وسیعی در حوزه پیل سوختی اکسید جامد برای تولید پیل‌هایی با ظرفیت 1-1000kW صورت گرفته است تا به تولید انبوه رسیده و تجاری گردند. این پیشرفت‌ها در حوزه ترکیبات مواد مورد استفاده و تکنولوژی ساخت لایه‌های اصلی پیل سوختی اکسید جامد به منظور افزایش بازده و کاهش هزینه تولید برای ورود به میدان مصرف صورت گرفته است. یکی از مهم‌ترین عوامل بر روی کاهش هزینه تولید، ساده‌سازی روش‌های ساخت و همچنین کاهش دمای عملکرد پیل سوختی اکسید جامد در حین افزایش عملکرد آن می‌باشد. قبلاً دمای کاری برای این نوع پیل سوختی 1000°C بوده است. با کاهش ضخامت الکترولیت به $10-12\mu\text{m}$ مقاومت الکتریکی آن کاهش می‌یابد و می‌توان همان مقدار انرژی که قبلاً در دمای بالا برای ضخامت $200\mu\text{m}$ تولید می‌شد را در دمای $150-200^{\circ}\text{C}$ تولید کرد [22]. کاهش بیشتر ضخامت الکترولیت سبب کاهش دمای کاری یا افزایش انرژی تولیدی نمی‌گردد و برای بازده بیشتر باید بر روی عملکرد الکترودها متمرکز شد. به عنوان نمونه کاهش بیش ولتاژ مخصوصاً در کاتد که سبب افزایش عمر مفید و کاهش خوردگی اتصال دهنده‌های فلزی می‌گردد. از عوامل تاثیرگذار بر روی بازده پیل سوختی اکسید جامد می‌توان به اندازه دانه‌های لایه‌های اصلی ساختار پیل سوختی، اتصال مناسب انتقال دهنده‌های یونی در کاتد و الکترون در آند، میزان مناسب تراکم در الکترولیت و تخلخل در کاتد و آند اشاره کرد که انتخاب مناسب ترکیبات مواد مورد استفاده و عملیات ساخت (لایه سازی) بر روی آن‌ها تاثیر می‌گذارد [23].

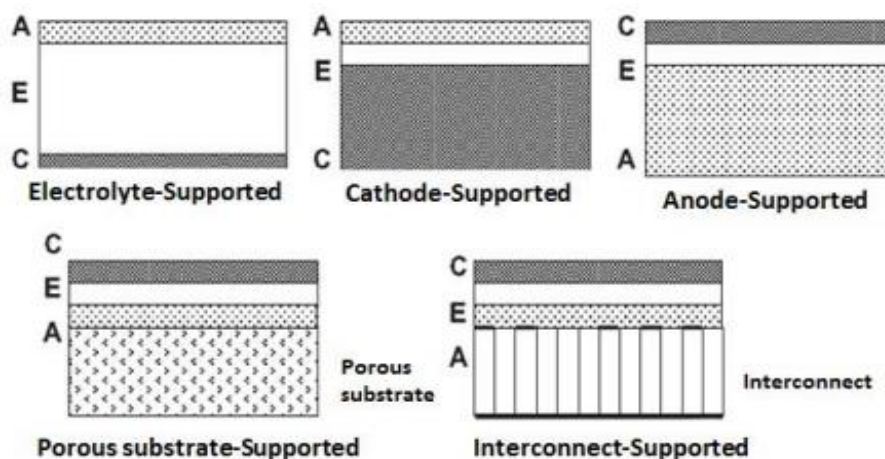
ساخت لایه نازک الکترولیت با کیفیت مناسب مهم‌ترین مرحله از تمام مراحل تولید لایه‌های اصلی پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد. نیاز به لایه نازک و در عین حال متراکم باعث ایجاد چالش در روش‌های مرسوم و قدیمی ساخت سرامیک گردیده است. این تکنیک‌ها در حالت کلی به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد. این فصل روش‌های ساخت لایه‌های پیل سوختی اکسید جامد را از هر دو دیدگاه علمی و اقتصادی شرح می‌دهد و در آخر هم مقایسه‌ای بین روش‌های لایه نشانی صورت گرفته است.

۲-۴) انواع پیل‌های اکسید جامد از لحاظ لایه نگهدارنده سلول

با توجه به ساختار لایه‌ای پیل‌ها و درجه حرارت کارکرد بالا در پیل سوختی اکسید جامد، تنش‌های وارده بر پیل که شامل تنش‌های حرارتی و مکانیکی می‌شود، می‌تواند باعث تخریب پیل گردد. لذا باید به گونه‌ای این تنش‌ها در سیستم تحمل شود بدون اینکه خللی در کارایی سیستم ایجاد شود. همچنین در ساخت پیل لازم است که یک لایه به عنوان زیر لایه تهیه شود و سپس لایه‌های دیگر بر روی آن پوشش داده شوند. این لایه را لایه پایه می‌گویند. اصولاً پنج نوع لایه‌ی پایه در طراحی برای پیل سوختی اکسید جامد وجود دارد که عبارتند از: پایه الکترولیت، کاتد، آند، متخلخل و اتصال دهنده. بسته به نقش زیرلایه، این زیرلایه می‌تواند متخلخل و یا متراکم و فشرده باشد.

۱-۲-۴) زیرلایه^۱

زیرلایه در یک پیل سوختی اکسید جامد یک تکیه‌گاه مکانیکی می‌باشد که دیگر لایه‌های اصلی بر روی آن لایه نشانی می‌شوند. بنابراین این زیرلایه باید دارای استحکام مکانیکی، پایداری شیمیایی و از لحاظ خواص حرارتی با دیگر لایه‌ها مطابقت داشته باشد. این زیرلایه خود می‌تواند نقش الکترولیت، کاتد، آند و یا اتصال دهنده را داشته باشد (شکل ۴-۱).

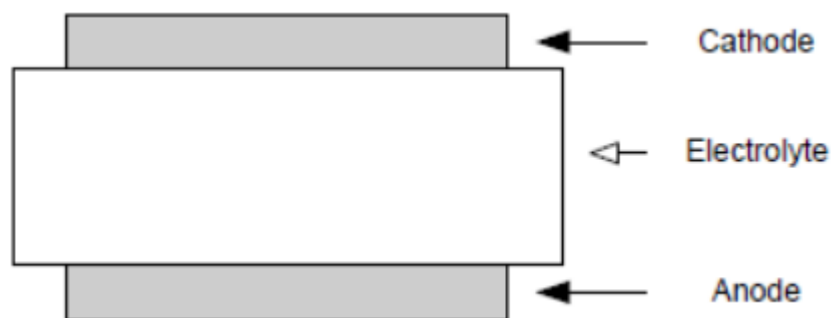


شکل ۴-۱ شماتیک از انواع تکیه‌گاه‌ها [24]

¹ Substrate

۴-۲-۲) پایه الکتrolیت

اولین طراحی‌های پیل‌های سوختی اکسید جامد صفحه‌ای از این نوع بودند. در این نوع طراحی با توجه به این که الکتrolیت ضخیم‌ترین لایه است، برای آنکه بتواند هدایت یونی مناسبی از خود نشان دهد بایستی درجه حرارت کارکرد پیل افزایش یابد (شکل ۴-۲). درجه حرارت بالا مشکلات زیادی از قبیل لزوم استفاده از مواد گران قیمت برای ساخت، عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی اجزاء پیل با هم، ایجاد تنش‌های حرارتی بالا، ایجاد ترک و در کل کاهش عمر پیل را به دنبال دارد.

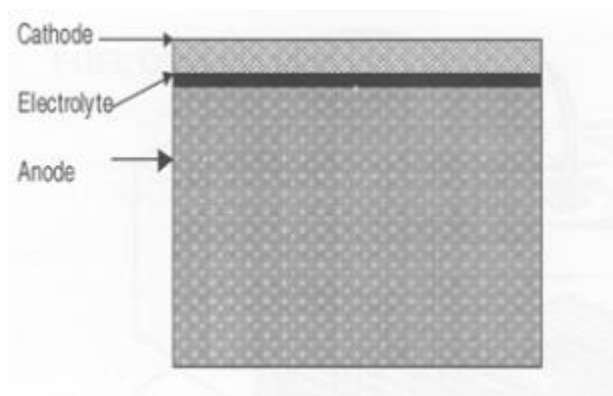


شکل ۴-۲ نمایش پیل سوختی اکسید جامد پایه الکتrolیت [24]

الکتroود در جایگاه تکیه‌گاه و فیلم نازک در نقش الکتrolیت در تکنولوژی جدید پیل سوختی اکسید جامد به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته است. این بدین دلیل است که قابلیت رسانایی الکتrolیت در میان دیگر لایه‌های اصلی کمترین مقدار را دارا می‌باشد و کاهش ضخامت آن یک روش موثر برای کاهش مقاومت اهمی آن و افزایش بازده پیل سوختی است.

۴-۲-۳) پایه کاتد

در این طراحی الکتroود کاتد ضخیم‌ترین لایه پیل می‌باشد. در پیل‌های سوختی اکسید جامد لوله‌ای، در ابتدا این نوع طراحی لحاظ می‌شد (شکل ۴-۳).



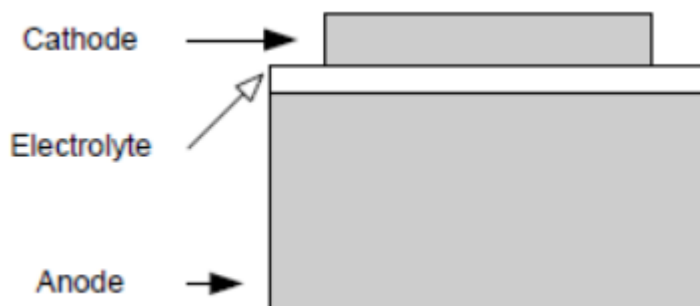
شکل ۳-۴ نمایش پیل سوختی اکسید جامد پایه کاند [24]

از مزایای این نوع ساختار، کاهش مقاومت اهمی و کاهش پلاریزاسیون آند می‌باشد. ولی با توجه به افزایش ضخامت الکتروود کاتد پلاریزاسیون غلظتی در این الکتروود افزایش می‌یابد.

استفاده از کاتد به عنوان تکیه‌گاه برای اولین بار بوسیله وستینگوس در قالب استوانه‌ای برای تکیه‌گاه فیلم‌های الکترولیت، آند و اتصال‌دهنده مورد استفاده قرار گرفت. زیرلایه استوانه‌ای شکل معمولاً بوسیله اکسترود یک خمیر سرامیکی از میان یک قالب با شعاع و طول مورد نظر ساخته می‌شود. خمیر سرامیکی مورد نظر مخلوطی از پودر کاتد، اتصال‌دهنده چسبی و ماده تشکیل‌دهنده خلل و فرج می‌باشد. بعد از عملیات خشک کردن، تیوب برای متخلخل شدن، ایجاد ریز ساختار مناسب و افزایش استحکام مکانیکی تحت عملیات سینترینگ (سینترینگ در آخرین بخش فرایندهای سرامیک مرطوب توضیح داده شده است) قرار می‌گیرد. به منظور اطمینان از کیفیت زیر لایه، آنالیز شیمیایی، استحکام مکانیکی، ضریب انبساط حرارتی، ضریب هدایت پخش اکسیژن و میزان تخلخل در حین تولید دسته‌ای با دقت پایش می‌شوند.

۴-۲-۴ پایه آند

در پیل‌های نوع صفحه‌ای اکثراً از این نوع طراحی استفاده می‌شود که دلیل آن کاهش مقاومت اهمی و کاهش پلاریزاسیون الکتروود کاتد می‌باشد.

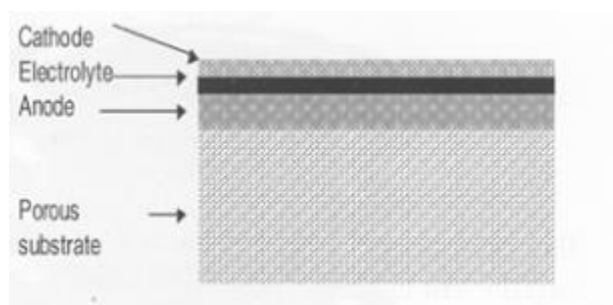


شکل ۴-۴ نمایش پیل سوختی پایه متخلخل [24]

ایده استفاده از آند به عنوان تکیه‌گاه برای اولین بار بوسیله دی سوزا و همکارانش در سال (۱۹۹۷) گزارش داده شد و کارایی الکتریکی بالای آن اثبات گردیده است [25]. از آن زمان به بعد استفاده از آند به عنوان تکیه‌گاه به طور وسیعی به عنوان یک استاندارد طراحی برای پیل‌های سوختی اکسید جامد صفحه‌ای مورد پذیرش قرار گرفت. البته مقاومت عبور جریان غلظتی در الکتروود آند تا حدودی وجود دارد که می‌توان با افزودن لایه داخلی بین الکتروود آند و الکتروولیت تا حدودی این مشکل را برطرف کرد. با توجه به اینکه الکتروود آند از مواد ارزان قیمت‌تر نسبت به سایر اجزاء پیل تشکیل شده است، قیمت پیل در این حالت کاهش می‌یابد.

۴-۲-۵ پایه متخلخل

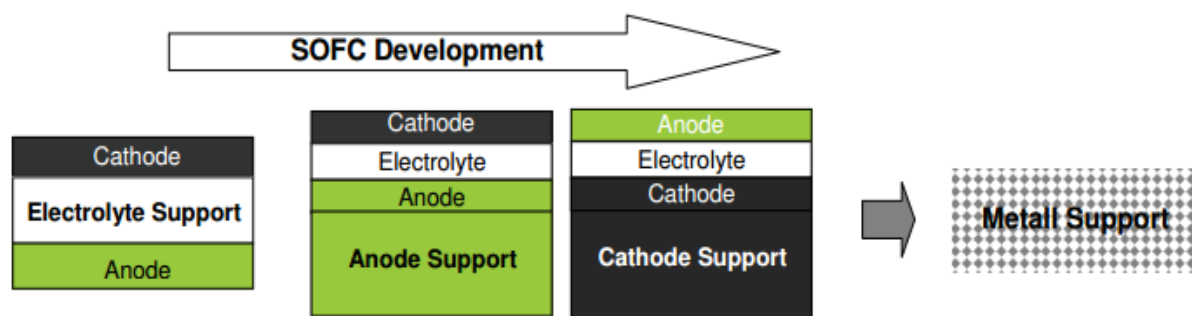
اغلب در سمت الکتروود آند این ساختار استفاده می‌شود. جنس آن از جنس الکتروود آند اما با میزان تخلخل بیشتر و اندازه دانه‌های بزرگتر می‌باشد. ساخت راحت از مزایای این نوع طراحی می‌باشد (شکل ۴-۵).



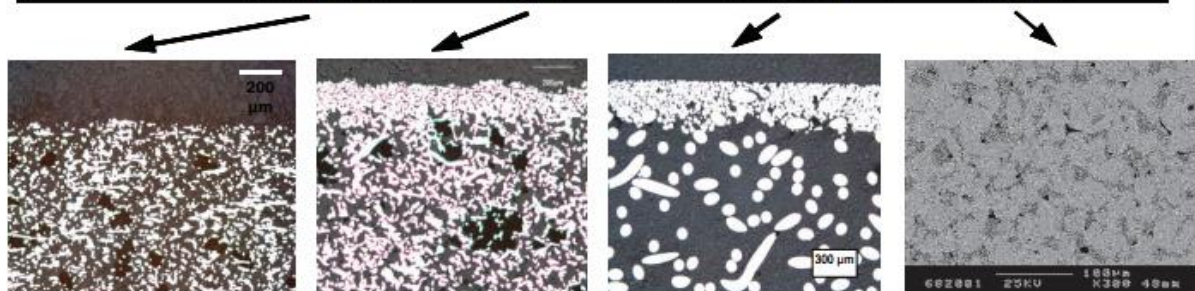
شکل ۴-۵ نمایش پیل سوختی پایه متخلخل [24]

در سال‌های اخیر، فلز متخلخل به عنوان یک زیرلایه برای تکیه‌گاه لایه‌های اصلی پیل سوختی اکسید جامد مورد بررسی قرار گرفته است. مزیت آن‌ها شامل قیمت پایین ساخت و افزایش دوام و ماندگاری می‌باشد. علاوه بر این آلیاژ فلزی دارای رسانندگی حرارتی و الکتریکی توام با هم هستند که این درزبندی استک را ساده می‌نماید. اما یک از مهم‌ترین چالش‌های آن چگونگی ساخت یک لایه متراکم الکتrolیت بدون ایجاد مشکل و عیب بر روی زیرلایه متخلخل فلزی می‌باشد. به منظور کاهش این مشکلات، تکنیک اسپری پلاسما خلاء برای لایه نشانی یک لایه متراکم الکتrolیت بر روی زیرلایه متخلخل فلزی مورد استفاده قرار گرفت که در آن مرحله متراکم‌سازی دما بالا نیاز نمی‌باشد [26].

این تکیه‌گاه به علت کاهش هزینه‌های مواد مورد استفاده برای تکیه‌گاه در مقایسه با Ni/YSZ (تکیه‌گاه آندی) و Perowskites (تکیه‌گاه کاتدی) بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی این نوع از تکیه‌گاه سبب افزایش هدایت الکترونیکی و حرارتی شده و می‌تواند در برابر تنش‌های مکانیکی مقاومت کند. در شکل ۶-۴ انواع تکیه‌گاه‌های فلزی نشان داده شده است.



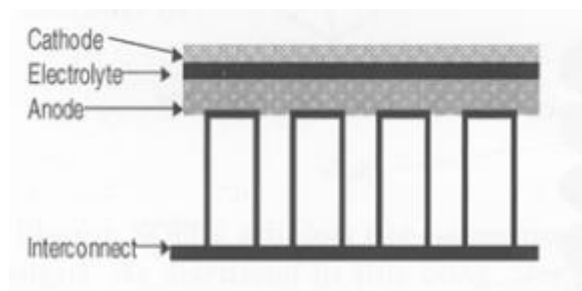
Substrate	Felts	Foams	Knit fabric	Sintered plate
Material	Ni	Fe-22Cr-5Al-0,1Y	Fe-22Cr-0,5Mn	Fe-26Cr (Y_2O_3)
Thickness	~ 1,0	~ 1,8	~ 1,0	~ 1,0
Porosity	~ 85	~ 80	~ 90	~ 50
Supplier	Bekaert, Belgium	Technetics, USA	Rhodium, Germany	Plansee AG, Austria



شکل ۴-۶ تکیه‌گاه فلزی [27]

۴-۲-۶ پایه اتصال‌دهنده

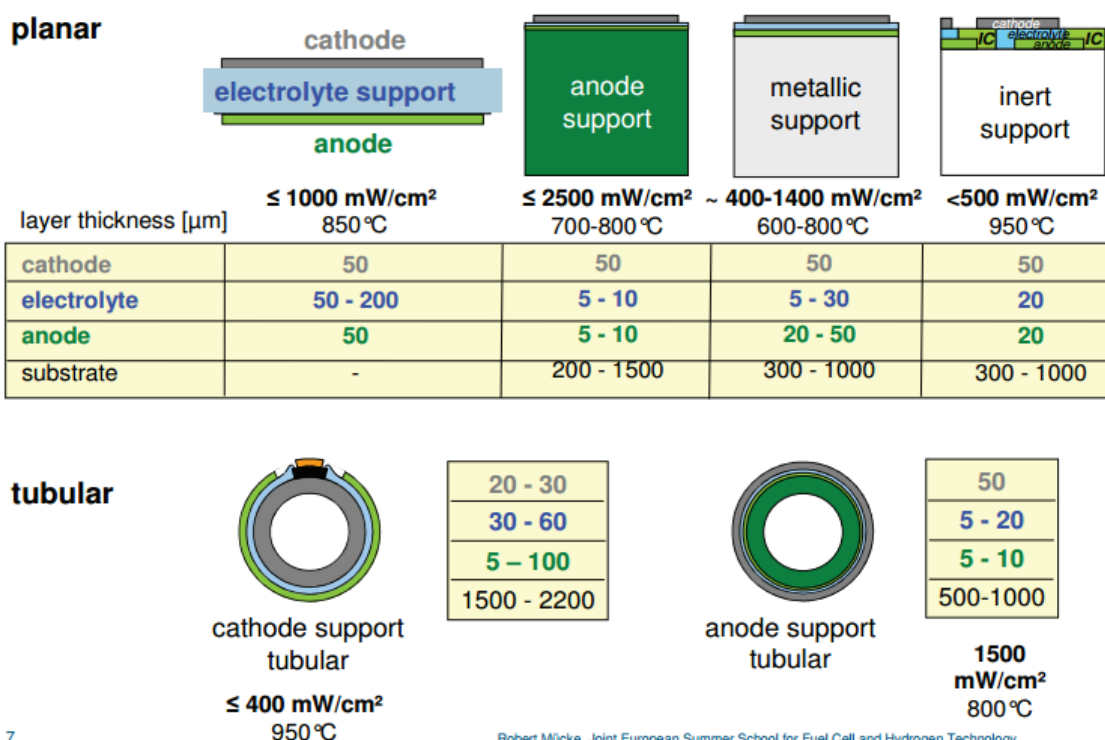
در این نوع طراحی اتصال‌دهنده اغلب از جنس آلیاژهای فلزی می‌باشد. از این لایه به عنوان زیرلایه برای عملیات پوشش‌دهی استفاده می‌شود اغلب در سمت الکترود آند این ساختار استفاده می‌شود. جنس آن از جنس الکترود آند اما با میزان تخلخل بیشتر و اندازه دانه‌های بزرگتر می‌باشد. ساخت راحت از مزایای این نوع طراحی می‌باشد.



شکل ۷-۴ نمایش پیل سوختی اکسید جامد پایه اتصال دهنده [24]

با توجه به فلزی بودن این پایه، درجه حرارت کارکرد پیل باید کاهش یابد. لذا عمر پیل افزایش می‌یابد. با کاهش درجه حرارت کارکرد پیل، توان خروجی آن کاهش می‌یابد. البته با انتخاب مواد مناسب برای کارکرد در درجه حرارت‌های پایین، می‌توان این مشکل را تا حدودی حل کرد.

نمونه‌ای از انواع تکیه‌گاه‌ها در دو حالت صفحه‌ای و لوله‌ای در شکل ۸-۴ آورده شده است.



شکل ۸-۴ انواع تکیه‌گاه‌ها در دو حالت صفحه‌ای و لوله‌ای [27]

جدول زیر به طور خلاصه مزایا و معایب انواع تکیه‌گاه را نشان می‌دهد [26].

نوع تکیه‌گاه	مزایا	معایب
الکترولیتی	دارای استحکام مکانیکی بالا به علت تراکم بالای الکترولیت	مقاومت الکتریکی بالا به علت ضریب رسانندگی پایین الکترولیت - به دمای بالاتری برای کاهش مقاومت اهمی نیاز دارد
کاتدی	دمای پایین فرایند به همراه استفاده از لایه الکترولیت نازک	رسانایی پایین تر - محدودیت انتقال جرم به علت ضخامت کاتد
آند	رسانایی بالای آند - دمای پایین فرایند به همراه استفاده از لایه الکترولیت نازک - قیمت پایین تر و طول عمر مفید بیشتر- پایداری مکانیکی خوب	محدودیت انتقال جرم به علت ضخامت آند
فلز متخلخل	ضخامت نازک لایه‌ها برای استفاده در دماهای پایین - امکان استفاده از موادی اضافی برای بهبود خواص	افزایش پیچیدگی ساخت به علت استفاده از مواد جدید- کم شدن پتانسیل الکتریکی به علت استفاده از تکیه‌گاه فلزی با سطوح ناهموار
اتصال دهنده‌ها	ضخامت نازک لایه‌ها برای استفاده در دماهای پایین - ساختار محکم و مقاوم	اکسیداسیون اتصال دهنده

۴-۳) روش‌های ساخت زیرلایه‌های پیل سوختی اکسید جامد

تکنیک‌های ساخت در حالت کلی به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند که عبارتند از:

۱. سرامیک مرطوب

۲. لایه نشانی مستقیم

۳. اسپری

۴-۳-۱) فرایندهای سرامیک مرطوب^۱

فرایندهای سرامیک مرطوب به روش‌هایی گفته می‌شوند که در حالت کلی مواد تشکیل‌دهنده لایه‌های پیل سوختی به صورت انحلال در آب (دوغاب) تهیه شده و سپس به صورت لایه‌های نازک در آمده و تحت عملیات سینتریگ به منظور تبخیر آب و تشکیل ساختار متخلخل برای الکترودها و یا ساختار متراکم (با تنظیم پارامترهای سینتریگ) برای الکترولیت قرار می‌گیرند. در این دسته از روش‌های ساخت لایه‌های پیل سوختی اکسید جامد، عملیات سینتریگ در چندین مرحله برای رسیدن به خواص مطلوب از جمله استحکام مورد نیاز برای لایه‌ها ضروری می‌باشد و چون مواد تشکیل‌دهنده لایه‌ها متفاوت می‌باشند، دمای سینتریگ آن‌ها باید متناسب با لایه مورد نظر باشد که این امر حتی می‌تواند سبب تخریب لایه‌های مجاور (لایه غیر هدف در آن عملیات سینتریگ) و حتی نواحی مرزی لایه‌های مختلف به علت اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی آن‌ها بشود. از دیدگاه اقتصادی می‌توان گفت که فرایندهای سرامیک مرطوب مقرون به صرفه‌تر می‌باشند اما دقت و کیفیت پایین‌تری نسبت به روش‌های لایه نشانی مستقیم دارند [28]. در ادامه روش‌های مختلف سرامیک مرطوب شرح داده خواهند شد.

¹ Wet-Ceramic Processing Methods

• ریخته‌گری نواری^۱

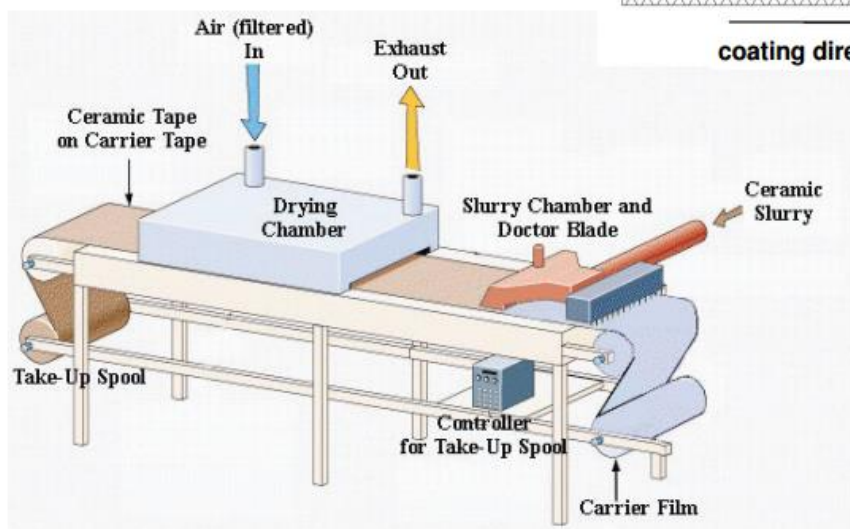
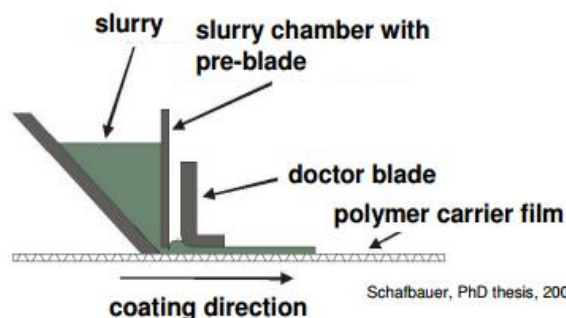
در ابتدای دهه‌ی (۸۰) میلادی طراحی موزائیکی پیل سوختی اکسید جامد با لایه نشانی که به طور کامل یک سلول را با ریخته‌گری نواری ایجاد می‌کرد، آغاز شد. روش مرسوم برای ساخت یک زیرلایه آند، فرایند ریخته‌گری نواری می‌باشد که در شکل ۴-۹ شماتیکی از این فرایند نشان داده شده است. این تکنیک در بسیاری از صنایع همچون صنایع الکترونیک، کاغذ، پلاستیک و ساخت رنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین مزیت ریخته‌گری نواری استفاده برای نواحی بزرگ، نازک و تخت سرامیکی یا بخش‌های فلزی، سرعت تولید بالا و قیمت ارزان می‌باشد. در حالت مرسوم روکش یا ماده دوغایی به داخل یک مخزن که پشت یک تیغه قرار دارد، ریخته می‌شود و یک قسمت حمل‌کننده در زیر آن‌ها برای جابه‌جایی لایه ریخته شده قرار دارد.

Substrate Manufacturing (Planar Designs) Tape Casting



Characteristics of the slurry

- adjusted viscosity
- no separation, segregation
- no agglomeration
- chemical system: powder, solvent, dispersant, binder, plastifier



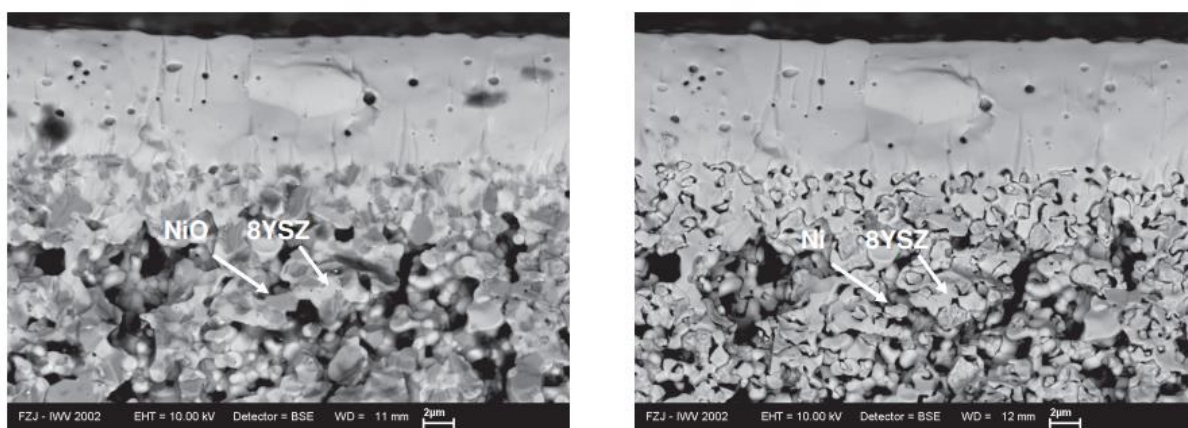
Process parameters

- controlled drying
- adjusted carrier film (adhesion)
- controlled support velocity
- controlled film thickness

شکل ۴-۹ شماتیکی از فرایند ریخته‌گری نواری [27]

^۱ Tape casting

فاصله بین تیغه و حامل ضخامت لایه دوغابی را تعیین می‌کند. دیگر عوامل تاثیرگذار عبارتند از: عمق مخزن، سرعت قسمت حامل، ویسکوزیته روکش و شکل تیغه جلوی مخزن. فیلم مرطوب از داخل محفظه خشک کن عبور می‌کند و حلال‌های آن از روی سطوح تبخیر می‌شوند. ضخامتی که معمولاً از فرایند ریخته‌گری نواری قابل دستیابی است، در محدوده $500-50\mu\text{m}$ قرار دارد اما با کنترل بهینه پارامترها ضخامت $30-10\mu\text{m}$ برای الکترودها قابل دستیابی است. احیاء NiO به Ni تخلخل (نسبت حجم منافذ یک توده به حجم کل توده) مطلوب‌تر برای آند را تضمین می‌نماید (شکل ۴-۱۰).



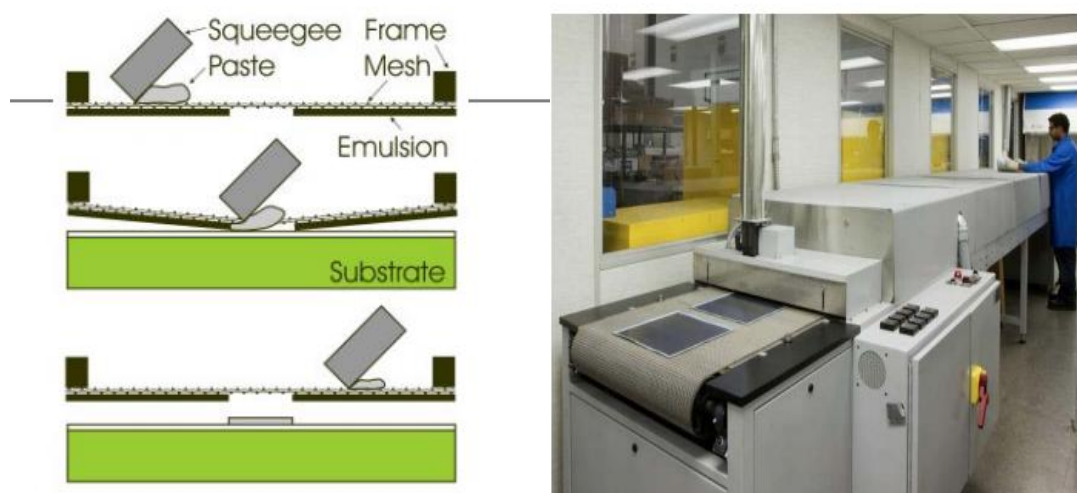
شکل ۴-۱۰ تاثیر احیاء NiO به Ni در تخلخل [27]

یک الکترولیت نیز بوسیله روش ریخته‌گری نواری و سینترینگ در دمای بالا قابل تولید است. به علت نیاز به تکیه‌گاه مکانیکی، ضخامت الکترولیت معمولاً $200-100\mu\text{m}$ است. مونتاژ کاتد/الکترولیت/آند بوسیله روی هم قرار دادن با یک اتصال‌دهنده فلزی کانالی شکل برای توزیع و پخش گاز صورت می‌گیرد [29].

• چاپ صفحه‌ای

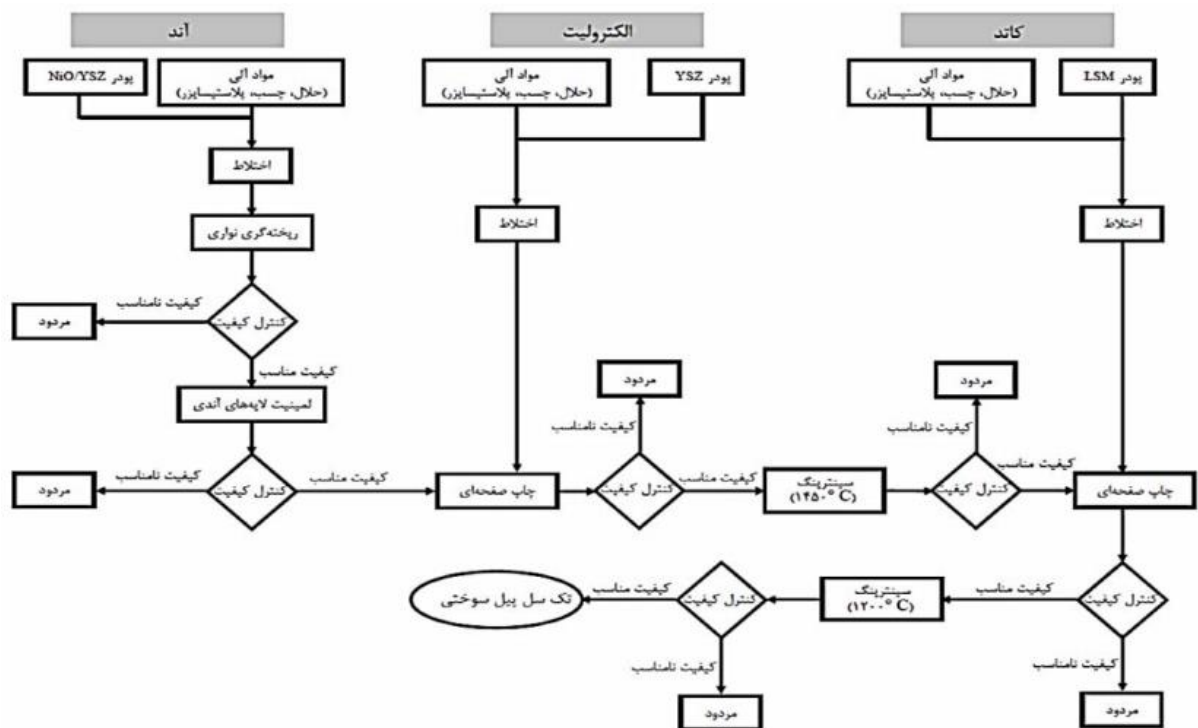
چاپ صفحه‌ای روش بسیار پرکاربرد و پذیرفته شده در حالت تکیه‌گاه آندی پیل سوختی اکسید جامد برای ساخت لایه کاتد می‌باشد. شکل ۴-۱۱ شماتیکی از این فرآیند را نشان می‌دهد. این روش به علت قابلیت اتوماسیون آسان، کیفیت بالا، ناحیه بزرگ برای پوشش‌دهی و قیمت ارزان همیشه مورد توجه بوده است. لایه‌های ساخته شده با این روش دارای ضخامت کمی می‌باشند و نمی‌توان از آن‌ها به عنوان تکیه‌گاه استفاده کرد و به همین دلیل این روش برای ساخت لایه نازک الکتروود و یا الکترولیت بر روی تکیه‌گاه ساخته شده به

روش ریخته‌گری نواری و یا دیگر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش یک روش استاندارد برای ساختن خازن‌های سرامیکی در صنایع الکتروسرامیک می‌باشد. فرمول جوهر و ماده پرینت مشابه فرایند پوشش‌دهی به روش ریخته‌گری نواری است. سایز پودر مورد استفاده برای این روش حدوداً $1.0 - 5 \mu\text{m}$ است و ضخامت معمول از فیلم کاتد به روش چاپ صفحه‌ای تقریباً $20 \mu\text{m}$ می‌باشد. بعد از خشک کردن اولیه، فیلم حاصل تحت عملیات حرارت‌دهی دما بالا قرار می‌گیرد و سرانجام به سطح الکترولیت متصل می‌شود [30].

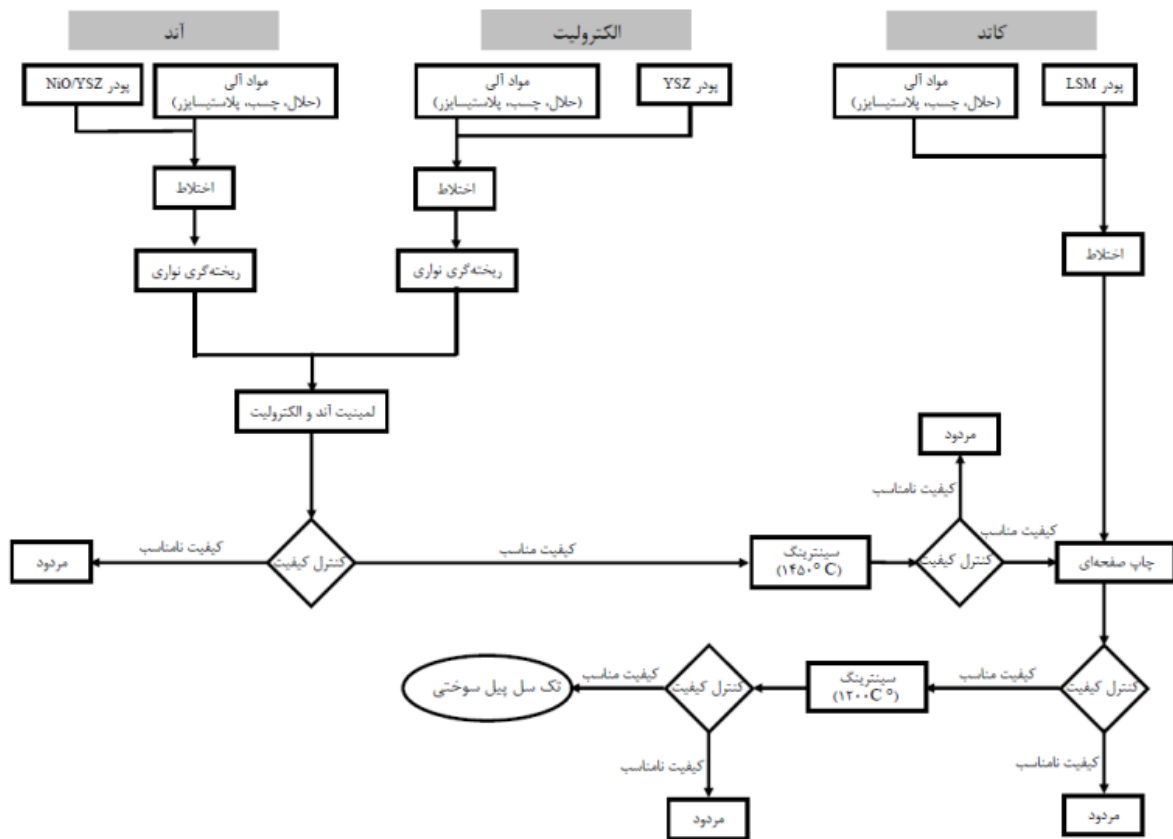


شکل ۴-۱۱ شماتیکی از روش چاپ صفحه‌ای

مراحل ساخت تک سل SOFC با ترکیب روش‌های چاپ صفحه‌ای و ریخته‌گری نواری را به دو روش متفاوت در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲ شماتیکی از کل فرایند برای ساخت تک سل SOFC به روش ترکیبی در روش ۱ [31]



شکل ۴-۱۳ شماتیکی از کل فرایند برای ساخت تک سل SOFC به روش ترکیبی در روش ۲ [31]

همان گونه که در جدول زیر نشان داده شده است بیشتر شرکت های تولید کننده پیل سوختی اکسید جامد از این دو روش برای تولید پیل سوختی اکسید جامد استفاده می کنند [32].

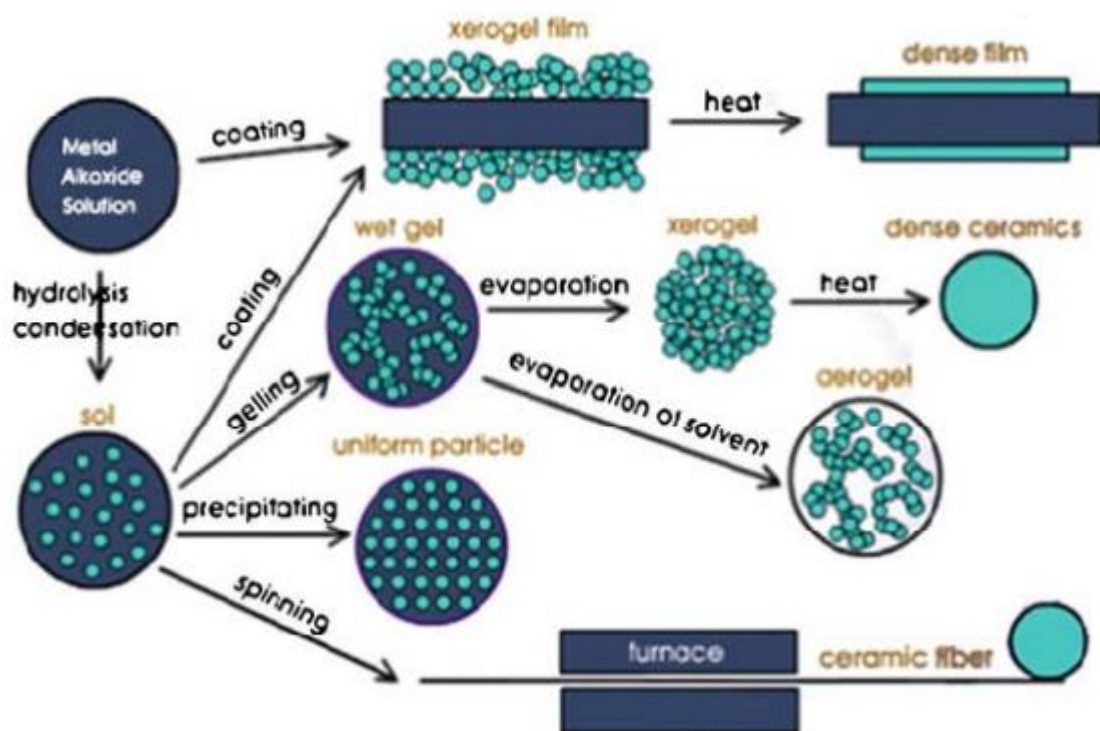
Company	Country	Component	Material	Production process	Thickness
Sulzer Hexis	CH	Electrolyte	YSZ	Tape casting	ns
		Cathode	(La,Sr)MnO ₃	Screen printing	ns
		Anode	Ni/YSZ	Screen printing	ns
ECN/InDec	NL	Electrolyte	YSZ	Tape casting	ns
		Cathode	(La,Sr)MnO ₃	Screen printing	50 μm (two layers)
		Anode	Ni/YSZ	Screen printing	graded composite
Fraunhofer Ges., IKTS	D	Electrolyte	YSZ	Tape casting	150 μm
		Cathode	(La,Sr)MnO ₃	Screen printing	ns, two layers
		Anode	Ni/YSZ	Screen printing	ns
CFCL	AUS	Electrolyte	3YSZ, 8YSZ	Tape casting	100 μm
		Cathode	(La,Sr)MnO ₃	Screen printing	50–60 μm
		Anode	Ni/YSZ	Screen printing	50 μm
SOFCo	USA	Electrolyte	YSZ, (Ce,Sm)O ₂	Pressing and sintering	180 μm, 300 μm
		Cathode	(La,Sr)CoO ₃	Screen printing	ns
		Anode	Ni/YSZ	Screen printing	ns
Tokyo Gas	JP	Electrolyte	3YSZ	Tape casting	50–100 μm
		Cathode	(La,Sr)MnO ₃	Screen printing	150 μm
		Anode	Ni/(Ce,Y)SZ	Screen printing	30 μm
Mitsui Eng. & Shipbuilding	JP	Electrolyte	8YSZ	Tape casting	300 μm
		Anode	Ni/YSZ	Painting	150 μm
		Cathode	(La,Sr)(Mn,Cr)O ₃	Painting	150 μm

• روش سل-ژل^۱

روش چاپ صفحه ای به مراحل پخت با دمای بالا برای جامد شدن و محکم ساختن لایه دوغابی لایه نشانی شده نیاز دارند که امکان واکنش های داخلی بین لایه های مجاور را افزایش می دهد و موجب محدودیت در ترکیب مواد می شود. برای کاهش دمای پخت از روش سل-ژل استفاده می شود. این روش برای ایجاد ذرات خام در مقیاس نانو است. یکی از مزایای این روش است که ذرات می توانند کاملاً متراکم، فشرده، محکم و جامد در دمای پایین تری در مقایسه با ذرات در مقیاس میکرون (روش چاپ صفحه ای)، استفاده شوند (شکل ۴-۱۴). مواد متشکل در حلال حل و به صورت مناسب پخش می شوند (با مخلوطی در مقیاس اتمی) که سیستم کلئیدال حاصل در مقیاس نانو، سل نامیده می شود. کلئید می تواند خشک شود و حالت جامد ایجاد گردد. بوسیله تبخیر می توان آن را چگالیده کرد تا برای تولید یک ماده دوغابی با ویسکوزیته بالا برای دیگر روش های لایه نشانی سرامیک مرطوب مانند چاپ صفحه ای به کار گرفته شود. همچنین سل می تواند به طور

¹ Sol-Gel

مستقیم بواسطه تکنیکی همچون پوشش دهی غوطه‌وری^۱ یا پوشش دهی چرخشی بر روی زیرلایه، لایه‌نشانی گردد. سپس پوشش باید در دمای پایین برای محکم شدن لایه خام اولیه به یک لایه سرامیکی پخته شود. اندازه ذرات در مقیاس نانو سبب ایجاد یک پوشش کاملاً متراکم در دو طرفه الکتrolیت در دمای پایین 600C⁰ می‌شود. از افزایش‌های آلی در سل برای افزایش پراکندگی ذرات و کاهش اندازه کریستالی و از ذرات جامد در سل برای افزایش اختلاط دو فاز استفاده می‌شود[33].



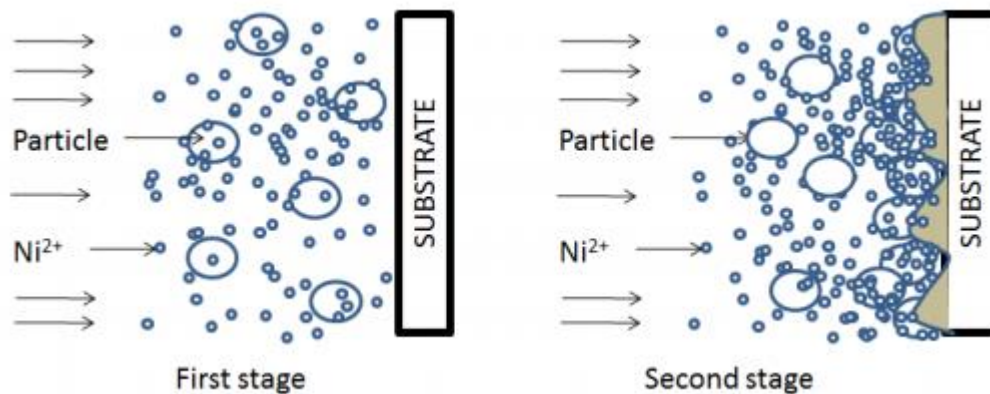
شکل ۴-۱۴ پروسه ساده شده فرایندهای سل - ژل [34]

¹ Dip coating

• آبکاری الکترولس^۱

این روش به عنوان آبکاری شیمیایی یا اتوکاتالیست شناخته می‌شود که از جریان الکتریسیته استفاده نمی‌کند و در این روش چندین واکنش شیمیایی به طور همزمان در یک محلول آبدار بدون استفاده از جریان الکتریکی خارجی رخ می‌دهد (شکل ۴-۱۵). محلول‌ها شامل یک منبع از فلز برای لایه نشانی، یک عامل کاهش شیمیایی، کامپلکسنت‌ها (که همگونی لایه نشانی اکسیدهای فلزی و ته‌نشینی را افزایش می‌دهند)، بافرها (به عنوان پایدار کننده برای جلوگیری از تجزیه خود به خودی محلول)، شتاب دهنده‌ها برای افزایش نرخ آبکاری و دیگر مواد عامل رطوبت‌زا می‌باشند. واکنش شیمیایی وقتی که هیدروژن آزاد می‌شود بوسیله عامل کاهش-دهنده، انجام می‌گیرد. این روش لایه نشانی قادر به لایه نشانی پوشش‌های فلزی بر روی زیرلایه‌های عایق می‌باشد. فلزاتی که معمولاً بدین روش لایه نشانی می‌شوند عبارتند از نیکل، کبالت، مس و پلاتینیوم. یکی از معایب این روش این است که محلول یون فلزی و عامل احیاءکننده شیمیایی باید از هم جدا نگه داشته شوند تا به سرعت با هم واکنش ندهند. به عنوان مثالی از این روش می‌توان وقتی آهن به داخل یک محلول یون‌های مس فرو برده می‌شود و مس بر روی زیرلایه آهن ته‌نشین می‌گردد، اشاره کرد. وقتی یک زیرلایه آهن در یک محلول مس سولفیت یا نیترات نقره فرو برده می‌شود، آهن حل می‌گردد، در حالی که مس و یا نقره روی سطح زیرلایه رسوب می‌کند. شکل (۷) مکانیزم آبکاری الکترولس لایه نشانی هم‌زمان نیکل را نشان می‌دهد. یون‌های نیکل ذرات اضافه شده به محلول را جذب و به دام می‌اندازند و آن‌ها را به روی زیرلایه می‌برند. یانزاوونگ از این روش برای ساخت آند و پایه فلزی آن هر دو در یک مرحله برای حذف انبساط ناشی از مرحله سینترینگ بهره برده است [24].

¹ Electroless plating

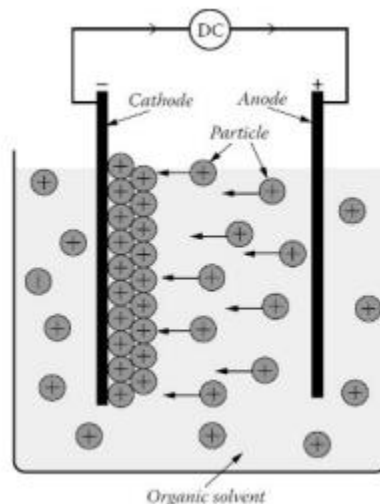


شکل ۴-۱۵ مکانیزم الکتروپلاسی لایه نشانی با هم [24]

• لایه نشانی الکتروفوریتیک^۱

همان‌طور که در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است، EPD یک روش لایه نشانی الکتروشیمیایی می‌باشد که در آن جریان مستقیم (DC) میدان الکتریکی برای لایه نشانی ذرات معلق (سাসپنشن) کلئیدال باردار روی یک زیرلایه باردار، استفاده می‌شود که این زیرلایه نیز می‌تواند حذف شود. روش EPD برای لایه نشانی پوشش‌های YSZ با ضخامت کمتر از $10\text{ }\mu\text{m}$ روی زیرلایه‌های LSM که متعاقباً در دمای بالا سینترنگ شده‌اند و لایه نشانی پوشش‌های LSGM و GDC برای تشکیل لایه‌های الکترولیت متراکم در دمای بالای پخت در اتمسفر کاهش یافته، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیبات حمام، دانسیته جریان و ولتاژ اعمالی در حین فرایند لایه نشانی می‌تواند موجب تغییر نرخ لایه نشانی گردد. فیلم‌های YSZ می‌توانند به عنوان لایه‌های الکترولیت بوسیله EPD در سیکل‌های متناوب لایه نشانی و سینترنگ تشکیل شوند. سه دقیقه لایه نشانی برای ایجاد لایه YSZ به ضخامت $2\text{ }\mu\text{m}$ نیاز است گرچه تعدادی سوراخ و منفذ هنوز در پوشش نازک الکترولیت وجود دارد. EPD همچنین در حال حاضر به عنوان یک روش ارزان‌تر نسبت به EVD برای لایه نشانی الکترولیت‌ها بر روی تکیه‌گاه کاتدی پیل‌های استوانه‌ای شکل مورد توجه قرار می‌گیرد [35].

¹ Electrophoretic (EPD)



شکل ۴-۱۶ لایه نشانی الکتروفورتیک برای لایه نشانی تکیه‌گاه آندی SOFC استوانه‌ای شکل [36]

• دیگر فرایندهای سرامیک مرطوب^۱

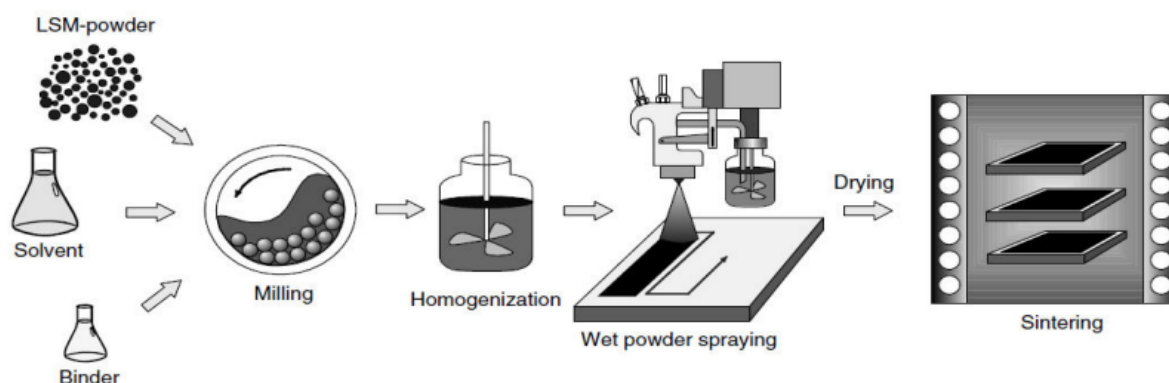
روش پینتینگ یک روش ساده برای لایه‌گذاری محلول دوغابی از پودر مورد نظر بوسیله یک موم بر روی تکیه‌گاه می‌باشد. با وجود سادگی، استفاده از این روش برای تولید انبوه سخت و مشکل می‌باشد چون عواملی همچون میزان فشار وارد شده به موم برای لایه‌گذاری، سرعت حرکت و مشخصات موم بر روی خواص پوشش تاثیر می‌گذارند [37].

از پوشش‌دهی چرخشی دوغاب سرامیک برای دستیابی به پوشش‌های متراکم و نازک لایه‌های الکترولیت YSZ به نازکی $1\ \mu\text{m}$ بعد از پختن آن، مورد استفاده قرار گرفته است [38].

روش نفوذ-اشباع، این تکنیک معمولاً به چندین مرحله اشباع‌سازی و پخت نیاز دارد که موجب افزایش زمان و هزینه آن می‌گردد اما به خاطر کاهش دمای پخت امکان استفاده از مواد متنوع‌تر و بیشتری را فراهم می‌کند و قابلیت انعطاف کاتالیست و طراحی الکترود را افزایش می‌دهد [39].

در شکل ۴-۱۷ شماتیکی از روش اسپری پودر مرطوب (کلوئیدال) نشان داده شده است. این روش برای ساخت تمام لایه‌ها با تخلخل لازم و با ضخامت یکنواخت در یک لایه بهینه شده است.

¹ Painting, Colloidal Spray Deposition, Spin Coating, and Slurry Coating



شکل ۴-۱۷ مراحل فرایند اسپری پودر مرطوب [38]

• سینترنگ^۱

در همه روش‌های سرامیک مرطوب که لایه خام اولیه نرم و سست است، مراحل سینترینگ برای متراکم‌سازی لایه‌ها یا جامد کردن آن‌ها برای دستیابی به تماس و اتصال مناسب بین ذرات مورد نیاز است. دمای پخت باید به مقدار کافی برای ایجاد استحکام در الکترولیت که معمولاً برای اکثر الکترولیت‌ها 1400°C است، زیاد باشد. به علت این که در این دمای بالا بین بعضی از لایه‌های الکترولیت-کاتد واکنش‌های داخلی رخ می‌دهد، مراحل پخت اغلب در حداقل دو مرحله جداگانه سینترینگ که در مرحله دما بالا سینترینگ یا پخت آند و الکترولیت با هم انجام می‌شود و در مرحله بعد که دما پایین است، مرحله سینترینگ برای محکم‌سازی کاتد به کار گرفته می‌شود. انتخاب دمای سینترینگ برای هر گام محکم‌سازی، دارای دو ملاحظه مهم می‌باشد اول اینکه باید دما به اندازه کافی بالا باشد تا اتصال بین لایه‌ها مثلاً کاتد و الکترولیت به خوبی برقرار گردد و از جهتی دیگر نباید به اندازه‌ای دما بالا باشد که سبب وقوع مشکلاتی از جمله واکنش بین لایه‌ها گردد [40]. نمونه‌هایی از این نواقص عبارتند از: تکیه‌گاه کاتدی پیل‌های استوانه‌ای که در دمای معمول افزایش استحکام الکترولیت واکنش‌های ناخواسته‌ای بین لایه‌ای بین LSM در کاتد و YSZ در الکترولیت رخ می‌دهد و همچنین پیل‌هایی با موادی که دمای ذوب آن‌ها پایین است مثل مس در آن‌ها که یا ذوب می‌شوند و یا مولفه‌های نانو ساختار آن‌ها در دمای بالای سینترینگ خشن و زمخت می‌گردند [39].

¹ Sintering

۲-۳-۴) تکنیک‌های لایه نشانی مستقیم

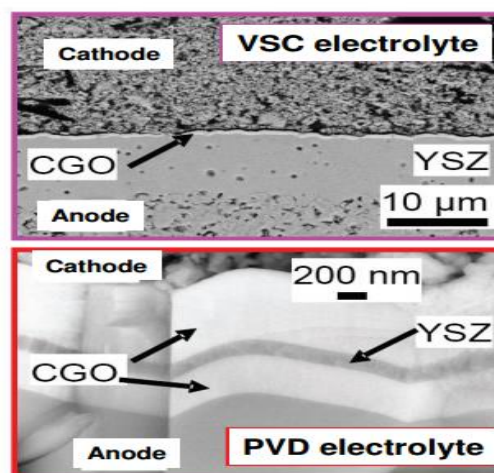
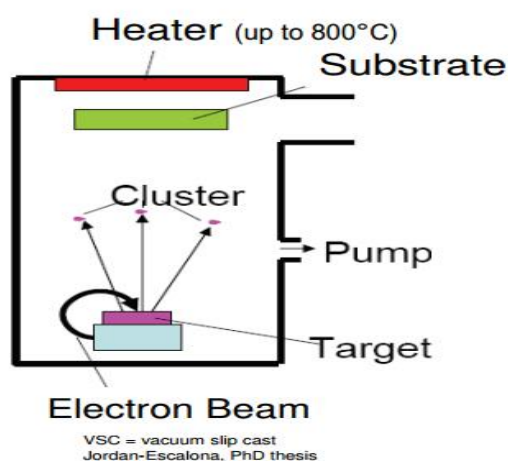
روش‌های سرامیک مرطوب با توجه به نیاز به مراحل سینتریگ (دمای بالا) سبب مشکلاتی از جمله واکنش‌های ناخواسته بین لایه‌ای، خشن و زمخت شدن ریز ساختار و امکان اکسید شدن لایه تکیه‌گاهی فلزی می‌گردد. برای کاهش این مشکلات، تمایل به استفاده از روش‌های لایه نشانی مستقیم به دلیل دمای پایین (حذف سینتریگ) بیشتر شده است.

• لایه نشانی فیزیکی بخار

برای ایجاد پوشش‌هایی با کیفیت بالا، از روش‌های لایه نشانی در خلا می‌توان استفاده کرد. از جمله این روش‌ها؛ روش‌های لایه نشانی فیزیکی بخار^۱ (PVD) است که تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی (Evaporative Deposition) یکی از انواع روش‌های PVD محسوب می‌شود که عبارت است از نشان دادن لایه نازک از یک ماده بر روی سطح مورد نظر در محیط خلأ به کمک فاز بخار. نام‌های دیگر آن لایه نشانی در خلأ، رسوب فیزیکی بخار و آبکاری تحت خلأ می‌باشد (شکل ۴-۱۸). طیف گسترده‌ای از مواد را می‌توان به کمک این روش بر روی سطوح نشانند. رایج‌ترین پوشش‌های سخت در این روش عبارتند از:

TiN , AlTiN , DLC , CrN , TiCN , ZrN

Physical Vapor Deposition (Electron Beam PVD, Sputtering)



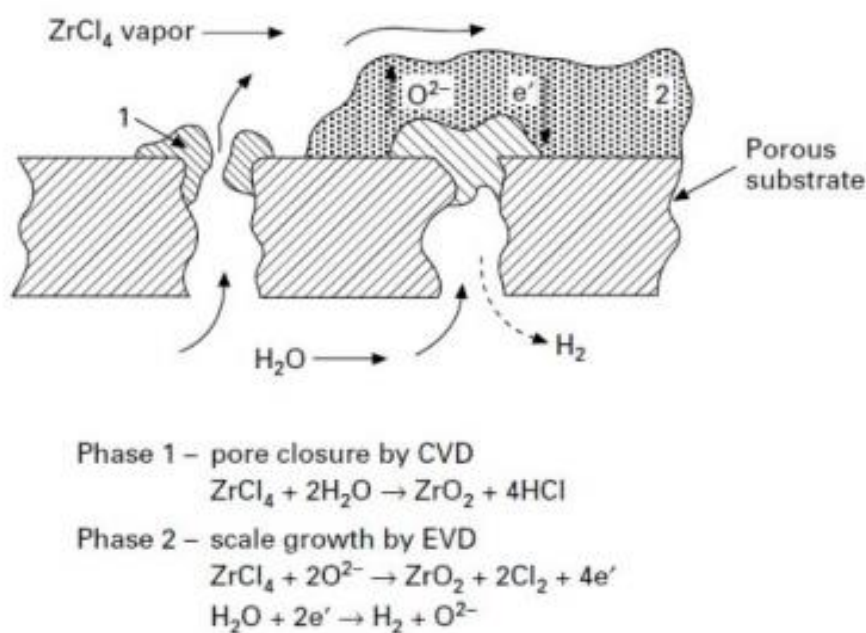
very thin PVD layers => low ASR

شکل ۴-۱۸ روش PVD [27]

¹ Physical Vapor Deposition

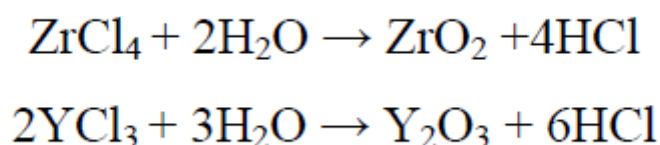
• لایه نشانی الکتروشیمیایی بخار^۱

روش EVD برای اولین بار در سال (۱۹۷۷) بوسیله شرکت الکتریکی وسینگوس اختراع گردید که برای تولید یک لایه نازک و فشرده 8YSZ روی یک استوانه متخلخل کلسیم افزوده شده با ZrO_2 و بعد از آن زیر لایه کاتد مورد استفاده قرار گرفت. مراحل اصلی فرایند در شکل ۴-۱۹ به طور شماتیکی نشان داده شده است.



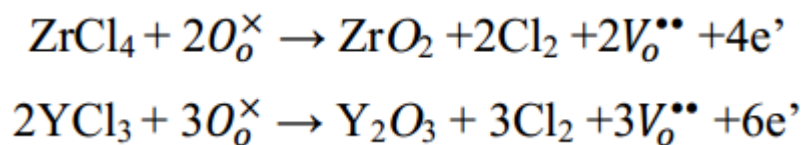
شکل ۴-۱۹ شماتیکی از اصول فرایند EVD. لایه نشانی بخار شیمیایی CVD [29]

زمانیکه گاز مخلوط $ZrCl_4$ و YCl_3 به سطح خارجی زیرلایه تیوبی می‌رسد و بخار آب به سطح داخلی در دمای معین ارسال می‌شود، واکنش شیمیایی ابتدا در مکان‌هایی که آن‌ها به هم می‌رسند رخ می‌دهد (منفذها) که عبارتند از:

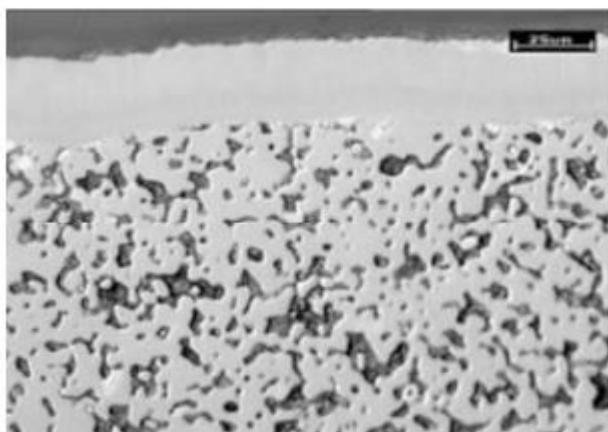


¹ Electrochemical Vapor Deposition

مرحله اول CVD می‌باشد. رشد لایه اولیه با زمان رابطه خطی دارد. به محض اینکه منافذ (سوراخ) سطح بسته شد، مرحله دوم این روش شروع به رخ دادن می‌کند. این فرایند با واکنش‌های شیمیایی زیر قابل بیان است:



و در نتیجه، یک فیلم از 8YSZ به رشد کردن ادامه می‌دهد که این مرحله را EVD می‌نامند. با توجه به نرخ‌های رشد برای دستیابی به $40\mu\text{m}$ فیلم (لایه) 8YSZ تقریباً 40 دقیقه در دمای 1000°C و ۲۰ دقیقه در دمای 1200°C نیاز است. شکل ۴-۲۰ نمایشی از ریز ساختار الکترولیت به روش EVD را نشان می‌دهد. شکی وجود ندارد که فرایند EVD قادر به تولید منافذ ریز، ضخامت خیلی نازک و متراکم فیلم الکترولیت می‌باشد. مهم‌ترین عیب فرایند EVD مشکل تولید انبوه به علت قیمت بالا آن با توجه به مواد مورد استفاده، تعمیر و نگهداری و دیگر مخارج آن می‌باشد. بعد از اثبات موفقیت چندین مولد پیل سوختی اکسید جامد بوسیله وسینگوس که در آن‌ها کاتد به عنوان تکیه گاه الکترولیت EVD استفاده شد، این تکنیک به علت گران قیمت بودن با روش اسپری پلاسما اتمسفری که قابلیت اتوماسیون شدن و تولید بیشتر را دارد، جایگزین گردید [29].

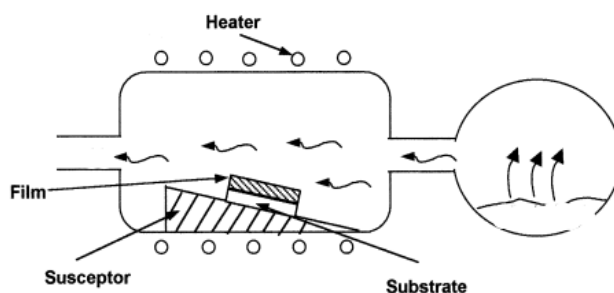


شکل ۴-۲۰ ریزساختار یک الکترولیت EVD بر روی یک زیرلایه متخلخل کاتد [29]

لایه نشانی بخار الکتروشیمیایی در حال حاضر برای تولید الکترولیت بر روی تکیه‌گاه کاتدی پیل‌های استوانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش EVD به ندرت برای تولید لایه آند پیل‌های استوانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد چون آن لایه‌ها قادر به تحمل دماهای بالا نیستند.

• لایه نشانی بخار شیمیایی^۱

لایه نشانی بخار شیمیایی (CVD) معمولاً برای ساخت فیلم‌های نازک الکترولیت (بوسیله واکنش گاز تشکیل شده از هالید فلزات با یک زیرلایه گرم) مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین عیوب آن نرخ پایین لایه نشانی، دمای بالای لایه‌نشانی، هزینه بالای تجهیزات و خوردگی محصولات می‌باشد. روش فلز-آلی (MOCVD) CVD از ماده اولیه شامل فلز-آلی فرار مانند β -diketonates استفاده می‌کند و می‌تواند در دماهای پایین در فشار اتمسفر انجام گیرد اما پیچیدگی سیستم تغذیه چندگانه برای هریک از اجزاء معمولاً از کاربرد آن را در لایه‌نشانی ساختارهای چندگانه جلوگیری می‌کند. شکل ۴-۲۱ شماتیکی از روش CVD را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۱ شماتیکی از لایه نشانی به روش CVD [41]

۳-۳-۴) روش‌های اسپری

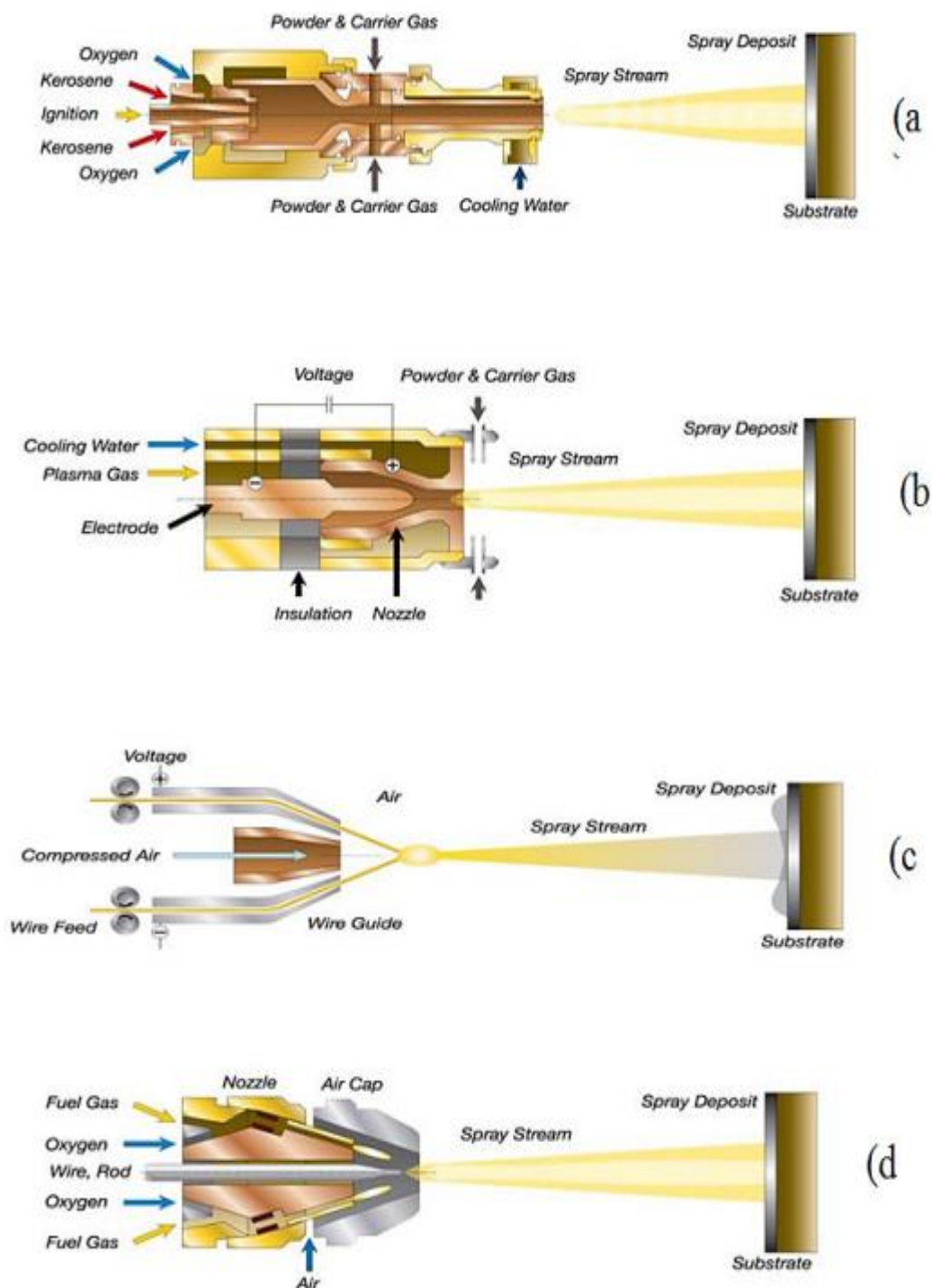
• اسپری حرارتی^۲

اسپری حرارتی یک تکنیک پوشش‌دهی بوسیله اسپری مواد بر روی سطح مورد نظر از میان هوا می‌باشد. مواد پوشش‌دهنده بوسیله روش‌های الکتریکی (پلازما یا جرقه (آرک)) و یا شیمیایی (شعله احتراق) قبل از اسپری شدن، حرارت می‌بینند. در این فرایند ماده پوشش‌دهنده در قالب پودر، سیم و مفتول (برای ذوب شدن و یا حالت نرم پیدا کردن) حرارت می‌بیند و به سمت زیرلایه شتاب گرفته و به آن می‌چسبد. اصول حاکم همه

^۱ Chemical Vapor Deposition

^۲ Thermal spraying

روش‌های اسپری حرارتی شبیه هم می‌باشد و در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. این تکنیک قادر به تولید پوشش‌هایی از $20\text{ }\mu\text{m}$ تا چندین میلیمتر روی مواد می‌باشد [24].



شکل ۴-۲۲ شماتیکی از فرایند اسپری حرارتی (a,b) HVOF اسپری پلاسما (c) اسپری قوسی (d) اسپری شعله [24]

• اسپری پلاسما^۱

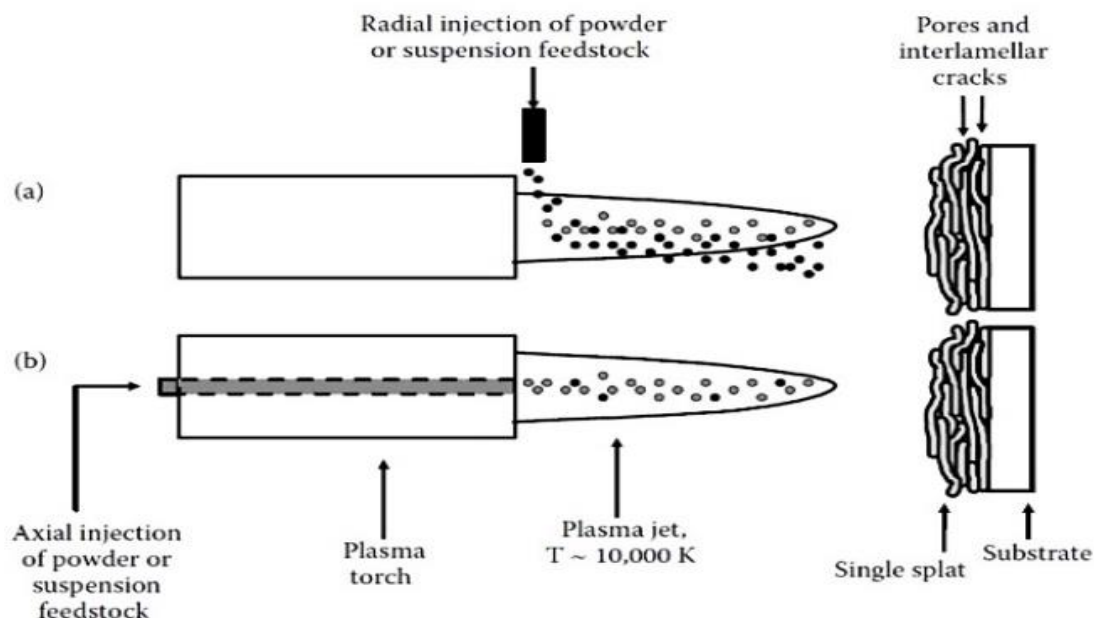
این روش برای تولید آند، کاتد و الکترولیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای بالای جت پلاسما (1000 K_0) ذرات را ذوب می‌نماید و قطرات مذاب به سمت زیرلایه رانده می‌شوند و به سرعت برای تشکیل پوشش، جامد و محکم می‌گردند. براساس اتمسفر (جو، هوا) پیرامون آن، روش اسپری پلاسما می‌تواند به اتمسفر معمولی (APS) و اتمسفر کنترل شده (CAPS) طبقه‌بندی شود.

برای اولین بار در سال (۱۹۹۰) وسینگوس، کاربرد تکنیک اسپری معمولی برای ساخت یک فیلم الکترولیت روی یک زیرلایه کاتدی در پیل سوختی اکسید جامد استوانه‌ای شکل مورد بررسی قرار داد.

اسپری پلاسما با فشار کم (LPPS) یک نوع از اتمسفر کنترل شده می‌باشد که برای لایه نشانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این نوع اسپری برای ساختن لایه متراکم الکترولیت مناسب‌تر می‌باشد. شماتیک فرایند حالت تزریق شعاعی و محوری به داخل جت پلاسما در شکل ۲۳-۴ آورده شده است. این روش بدلیل سرعت بالای لایه نشانی، توانایی لایه نشانی لایه‌های پیل سوختی اکسید جامد مستقیماً بر روی زیرلایه‌های فلزی بدون نیاز به سینترینگ، توانایی تغییر ترکیبات و سادگی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اما استفاده از پلاسما اسپری برای ساخت چالش‌هایی را به همراه دارد از جمله پوشش‌های ایجاد توسط روش مرسوم اسپری پلاسما دارای تخلخل باز ۵-۱۵٪ می‌باشد (تراکم مورد نیاز برای الکترولیت (بطور ایده آل ۰٪ تخلخل (منافذ) باز)، پوشش‌های الکتروود (تا ۴۰٪ تخلخل باز). تلاش‌های زیادی برای بسط دادن محدوده تخلخل پوشش‌های پلاسما اسپری اتمسفری انجام شده است که شامل بهبود تجهیزات و نیز مواد اولیه و پارامترهای پروسه می‌باشد. همچنین تحقیقات گسترده‌ای برای ایجاد لایه‌های ایده‌آل برای الکتروودها، به روش اسپری پلاسما در حال انجام است. این تکنیک برای تولید انبوه و مساحت‌های بزرگ پیل و با قابلیت اتوماسیون بالای آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

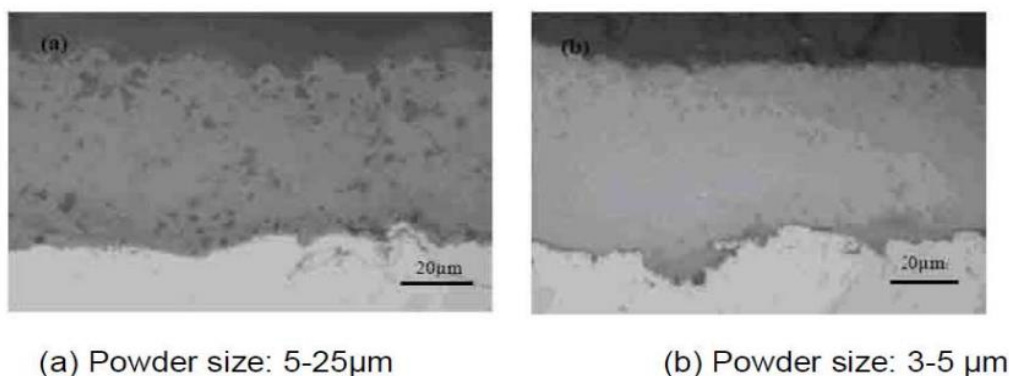
¹ Plasma spraying

در روش دیگر اسپری پلاسما از دوغاب مایع استفاده می‌کند که تبدیل به پودر می‌شود (atomized) و سپس به داخل پلاسما تغذیه می‌گردد. ترکیبی از دوغاب مایع و پودر برای تولید مواد با یک گستره از پوشش‌های نازک و متراکم برای الکترولیت تا الکترودهای با تخلخل بالا بسیار کاربردی و مورد توجه است [39].



شکل ۴-۲۳ شماتیک از اسپری پلاسما شعاعی و محوری [39]

شکل ۴-۲۴ ریزساختار مقطع دو نمونه از پوشش الکترولیت YSZ را که با دو نوع پودر با مقیاس ابعادی 3-5 μm و 5-25 μm توسط تورچ پلاسما با تزریق محوری پودر تهیه شده نشان می‌دهد.

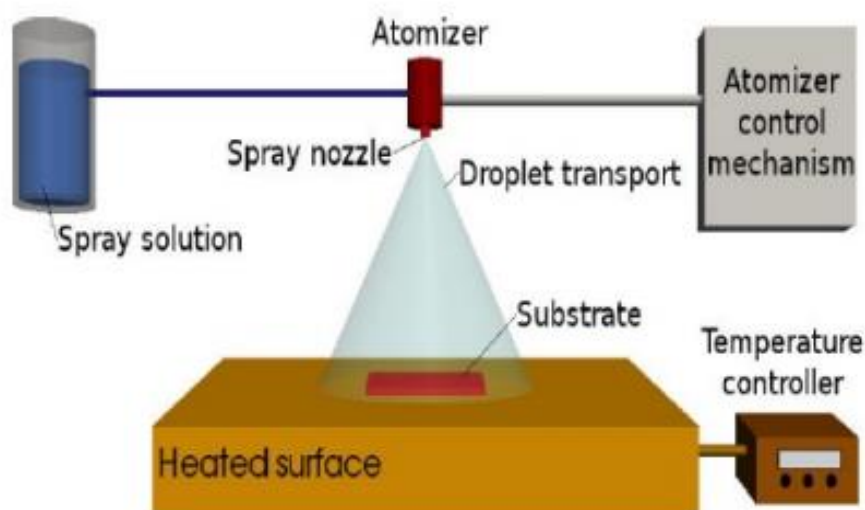


شکل ۴-۲۴ ریز ساختار مقطع پوشش با تورچ پلاسما با تغذیه پودر محوری [42]

فرایند اسپری پلاسما یک تکنیک پوشش‌دهی به حد بلوغ رسیده و اثبات شده برای استفاده در صنایع هوا فضا و تولید پودر برای کاربرد به عنوان پوشش عایق حرارتی تیغ‌های توربین گاز، پره‌ها، محفظه احتراق و ... می‌باشد. پوشش، به طور قابل توجهی کارایی خنک‌کاری پره توربین را بهبود می‌بخشد و از خوردگی داغ جلوگیری می‌کند.

• اسپری پیرولیز^۱

در این روش (شکل ۴-۲۵)، یک محلول محتوی مواد تشکیل‌دهنده پوشش با روش‌های مختلف اتمایز و بر روی سطح مورد نظر که تا دمایی در محدوده 400-575 C گرم شده، اسپری می‌شود. گرمای سطح مورد پوشش باعث تبخیر محلول شده و سبب رسوب مواد تشکیل‌دهنده پوشش بر روی سطح می‌شود. سپس با انجام عملیات حرارتی در دمایی در حدود 500 C ساختاری منظم ایجاد می‌کند. روش اسپری پیرولیز برای تولید پودرهای مواد SOFC و همچنین لایه‌های اجزاء SOFC مورد استفاده قرار می‌گیرد. پوشش‌های نازک (1 μm) بوسیله این روش ساخته شده است اما نیاز به عملیات حرارتی بعد از لایه نشانی است.



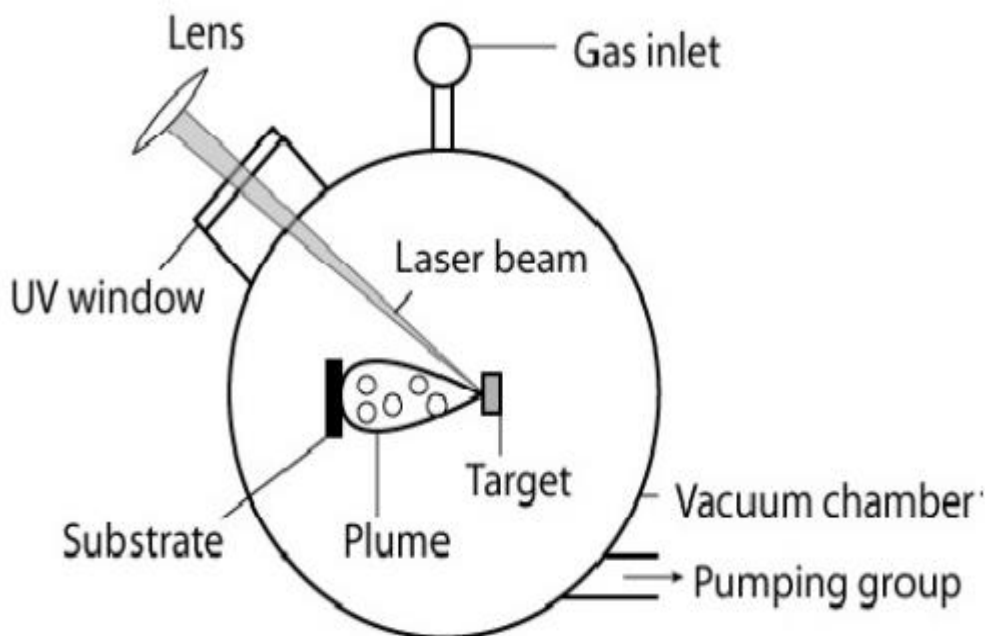
شکل ۴-۲۵ نمای کلی از فرایند اسپری پیرولیز [43]

^۱ Spray Pyrolysis

روش اسپری پیرولیز برای پوشش‌دهی سلول‌های خورشیدی و سنسورها نیز کاربرد دارد و روش نسبتاً ساده و ارزان قیمت می‌باشد.

- لایه نشانی لیزر پالسی^۱

لایه نشانی لیزر پالسی (PLD) یک تکنیک خلاء بر اساس برداشت ماده از یک سطح و سپس جمع‌آوری و لایه نشانی آن روی یک زیرلایه (که معمولاً در دمای 700 C) می‌باشد. نرخ لایه نشانی آن معمولاً در حدود ($1 \mu\text{m/hr}$) می‌باشد گرچه نرخ لایه نشانی $600 \mu\text{m/hr}$ نیز گزارش شده است (شکل ۴-۲۶). در حالی که این تکنیک برای مقادیر بزرگ مناسب نیست اما برای تولید پیل‌های سوختی اکسید جامد کوچک به دلیل دمای پایین فرایند و قابلیت اتوماسیون شدن آن به علاوه ظرفیت کنترل ساختار نانو بوسیله این روش، مورد توجه قرار گرفته است [44].



شکل ۴-۲۶ شماتیکی از فرایند لایه نشانی لیزر پالسی [44]

^۱ Pulsed-Laser Deposition or Laser Ablation

۴-۴) نتیجه گیری

با توجه به مطالب بیان شده مشخص است که برای هر مقصد و هدف خاص باید فرایند تولید متناسب با آن به کار گرفته شود. با توجه به شرح انواع روش‌های ساخت لایه‌های (آند-الکترولیت-کاتد) پیل سوختی اکسید جامد، یکی از بهترین روش‌ها هم از لحاظ تکنیکی و هم از نگاه اقتصادی، روش اسپری پلاسما می‌باشد که هم اکنون تحقیقات گسترده‌ای پیرامون آن در حال انجام می‌باشد. با توجه به رویکردهای آتی در تولید پیل‌های پایه فلزی، ساخت پیل‌های لایه‌بندی شده FGM و قابلیت اتوماسیون فرایند، برای روش پاشش حرارتی آینده خوبی متصور است. روش‌های ریخته‌گری نواری و چاپ صفحه‌ای نیز به حد بلوغ خود برای تولید انبوه رسیده‌اند. روش‌هایی مثل روش اسپاترینگ و پالس لیزر به علت هزینه بالا هنوز مقرون به صرفه نیستند و برای مقاصد خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیگر روش‌های تولید نیز به سرعت در حال رشد هستند و هر کدام مزیت‌ها و معایبی دارد، مثلاً روش سل-ژل دارای قیمت پایینی می‌باشد اما احتمال ایجاد ترک در این روش وجود دارد. در مجموع به نظر می‌رسد با توجه به تفاوت‌های ساختاری لایه‌های مختلف (ضخامت، ترکیب مواد، ریز ساختار مناسب و ...) انتخاب یک روش واحد که برای ساخت تمامی لایه‌ها از لحاظ تکنیکی و اقتصادی مناسب باشد مقدور نیست و بهترین حالت شاید ترکیبی از این روش‌ها باشد. در جدول زیر مقایسه مختصری بین روش‌های تولید لایه‌ها آورده شده است.

فرآیند ساخت	نوع مواد	هزینه	مزایا	معایب
ریخته‌گری نواری	YSZ, Ni-cermet, LSM	پایین	فناوری با قابلیت انطباق بالا، قابلیت تولید انبوه، ساخت لایه‌های چندگانه	ساخت لایه با ضخامت بالای ۵۰ میکرومتر
ریخته‌گری دوغابی	YSZ	پایین	فناوری با قابلیت انطباق بالا، لایه چگال	احتمال تشکیل ترک
سل - ژل	YSZ - LSM	پایین	ساخت لایه‌های نازک با پگالی بالا و دما سینترینگ پایین، کنترل ضخامت لایه خوب	تعداد دفعات تکرار زیاد و احتمال تشکیل ترک
چاپ صفحه‌ای	YSZ, NiO, LSM	متوسط	لایه نشانی چند لایه بر روی زیر لایه با تخلخل یا چگال با کنترل خوب تخلخل	حداقل نیاز به ساخت لایه ۱۰ میکرومتر
اسپری پلاسما	YSZ, NiO, LSM	متوسط	ساخت چند لایه با یک فرآیند اسپری، لایه چگال، کنترل تخلخل	جهت کنترل مناسب تخلخل به بهینه‌سازی نیاز است
کلندرینگ	YSZ	متوسط	لایه نشانی چند لایه بر روی زیر لایه با تخلخل یا چگال با کنترل خوب تخلخل	ترک سطح
لایه نشانی الکتروفورز	YSZ	متوسط	بدون محدودیت در شکل زیر لایه، تولید انبوه، ساخت لایه‌های چگال	عدم ضخامت یکنواخت، ترک سطح
لایه نشانی تبخیر التروشمیایی	YSZ, cermet anode	بالا	کاربرد زیاد میکروالکترونیک و ساخت لایه‌های یکنواخت با کیفیت بالا	دمای بالای واکنش، خوردگی مواد اولیه، نرخ کند ساخت
لایه نشانی پالس لیزر	YSZ	بالا	لایه نشانی تقریباً هر ماده‌ای	ترک لایه، عدم لایه یکنواخت

هزینه‌های ساخت و تولید

۵-۱) مدل هزینه ساخت SOFC توسط Battelle

Battelle، تحت یک توافق نامه همکاری ۵ ساله با برنامه سلول سوختی وزارت انرژی ایالات متحده (DOE)، یک ارزیابی مستقل از هزینه‌های تولید سلول سوختی در حجم‌های مختلف و طرح سیستم مناسب برای بازار را فراهم آوردند. این گزارش هزینه‌های تولید سیستم‌های سلول سوخت را با استفاده از فرایندهای تولید مناسب در مقیاس سالانه تولید ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰،۰۰۰ و ۵۰،۰۰۰ واحد مشخص می‌کند.

اجزای اصلی طرح‌های نمونه با استفاده از فرایندهای تولیدی مدل‌سازی شده با نرم افزار Boothroyd Dewhurst, Inc. (BDI) Design for Production and Assembly (DFMA®) مورد ارزیابی قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل حساسیت شامل هزینه‌های برخی از اجزای گران‌تر و آن دسته از اجزایی است که هزینه‌های آن‌ها کمتر مشخص است.

۵-۲) رویکرد

روش تجزیه و تحلیل هزینه Battelle یک رویکرد چهار مرحله‌ای است (جدول ۱):

مرحله ۱ - ارزیابی بازار

مرحله ۲ - طراحی سیستم

مرحله ۳ - مدل‌سازی هزینه

مرحله ۴ - تجزیه و تحلیل حساسیت / تجزیه و تحلیل هزینه چرخه زندگی

جدول ۱ رویکرد تجزیه و تحلیل هزینه‌های Battelle [45] [46]

ارزیابی بازار	طراحی سیستم	مدل‌سازی هزینه	تجزیه و تحلیل حساسیت / تجزیه و تحلیل هزینه چرخه زندگی
(۱) مشخص کردن بازار های دارای پتانسیل (۲) شناسایی نیازهای قابل استفاده و اجرایی (۳) ارزیابی فناوری‌های پیل سوختی نسبت به نیازها (۴) انتخاب سیستم‌های مشخص برای مدل هزینه	(۱) انجام جست‌وجو در مکتوبات (۲) توسعه‌ی طراحی سیستم (۳) جمع‌آوری نیازهای صنعت (۴) اندازه قطعات و تجهیزات (۵) تصحیح طراحی (۶) توسعه‌ی BOM ^۱ (۷) تعریف فرآیندهای تولید (۸) برآورد تجهیزات مورد نیاز	(۱) جمع‌آوری نقل قول‌های فروشندگان (۲) تعریف هزینه‌های مواد (۳) برآورد هزینه‌های سرمایه‌گذاری (۴) تعیین منابع بیرونی (۵) هزینه‌ی اجزاء (۶) برآورد سیستم مونتاژ (۷) توسعه‌ی هزینه‌های اولیه (۸) بهبود مدل‌ها و بروزرسانی هزینه‌ها	تجزیه و تحلیل حساسیت هزینه‌های فردی

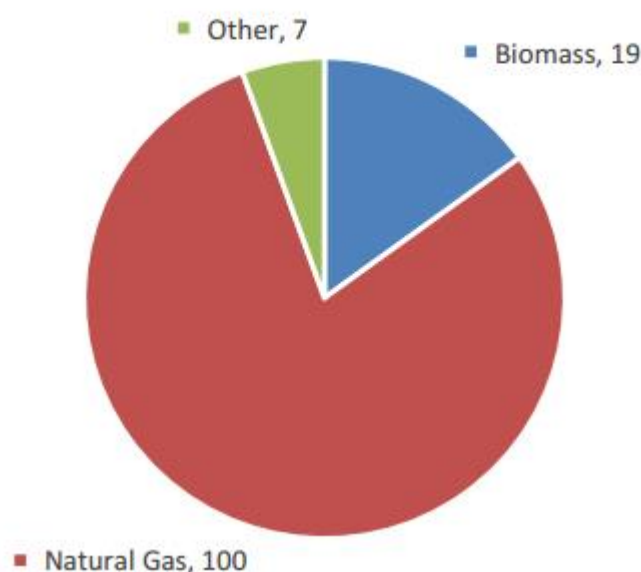
¹ bill of materials

۵-۳) تجزیه و تحلیل بازار

۵-۳-۱) نیازمندی‌های بازار و ویژگی‌های موردنظر

با توجه به شکل ۵-۱ می‌توان مشاهده نمود که بیشتر سلول‌های سوختی از سوخت گاز طبیعی استفاده می‌کنند که بیشتر از سوخت‌های BioMass و سایر سوخت‌ها می‌باشد. برای جذاب بودن، به خصوص برای یک تکنولوژی در حال ظهور مانند سلول‌های سوخت، صرفه جویی در مقایسه با برق شبکه باید قابل توجه باشد.

Number of Fuel Cell Installations by Fuel Type



شکل ۵-۱ تعداد پیل‌های سوختی نصب شده بر اساس نوع سوخت [45] [46]

۵-۳-۲) انتخاب فناوری

سه عملیات فن آوری پیل سوختی در نظر گرفته شده: در دمای پایین (LTPEM)، درجه حرارت بالا (HTPEM) و SOFC.

در بحث با چندین متخصص، معلوم شد که احتمال رسیدن HTPEM به عمر قابل قبول بعید بوده و مطمئناً قابلیت عمر مورد نیاز ۴۰,۰۰۰ ساعت را ندارد. سیستم‌های SOFC و PEM دارای ویژگی‌های عملیاتی مختلف هستند و بنابراین ممکن است بخش‌های مختلف بازار را تامین نمایند. سیستم‌های SOFC ارزان‌تر از PEM بوده چرا که سیستم‌های PEM نیاز به اصلاح سخت افزار و استفاده بیشتر از فلزات گران‌بها دارند.

۳-۳-۵) نتیجه‌گیری تجزیه و تحلیل بازار

هر دو سیستم SOFC و PEM پتانسیل برنامه‌های کاربردی در بازار CHP دارند. دوام نشان داده شده برای استک PEM بطور قابل توجهی بالاتر از SOFC بوده و از لحاظ بارگیری برای برنامه‌های کاربردی که نوسانات بار قابل توجهی را تجربه می‌کنند، برتر است. انعطاف‌پذیری بیشتر PEM برای مصارف مسکونی، رستوران و برخی برنامه‌های کاربردی دیگر در مقیاس‌های کوچک‌تر که در معرض شرایط عملیاتی غیرقابل کنترل قرار دارند مفید خواهد بود. SOFC در نهایت ارزان‌تر، دارای کارایی بالاتر و قادر به عملکرد در بارهای حرارتی بالاتری می‌باشد. در این نقطه در توسعه بازار CHP، هیچ دلیلی برای انتخاب یک تکنولوژی واحد وجود ندارد.

۴-۵) مشخصات سیستم

این بخش یک توصیف کلی از سیستم‌های انتخاب شده برای تجزیه و تحلیل را فراهم می‌کند. انتظارات اولیه برای سه سیستم مختلف مورد توجه قرار گرفته می‌شود - یکی برای هر فناوری پیل سوختی. با این حال، همانطور که در بخش ۳ اشاره شد، فناوری HTPEM با کمبود انتظارات طول عمر CHP همراه بود. بنابراین، تنها سیستم SOFC و LTPEM در نظر گرفته می‌شود.

۱-۴-۵) توضیحات عمومی

این گزارش مربوط به برنامه‌های اولیه و CHP است، یعنی سیستم‌های ثابت که قدرت الکتریکی را تامین می‌کنند و ممکن است از انرژی تلف شده برای تبدیل انرژی حرارتی به نوعی فرایند یا گرمایش استفاده نمایند. این سیستم‌ها ممکن است برای اندازه‌ی بار گرمایی خاص یا یک بار الکتریکی خاص تنظیم شده باشند.

۲-۴-۵) معیارهای اسمی

جدول ۲ اهداف عملکرد را به عنوان طرح‌های نمونه در حال توسعه در نظر می‌گیرد. جدول ۳ اطلاعاتی در مورد طراحی استک پیل‌های سوخت برای سیستم‌های SOFC ارائه می‌دهد.

Metric/Feature	Objective
Input, Fuel	Utility Natural Gas or Propane (>30 psig preferred)
Input, Air	Ambient air (-20° to 50°C)
Input, Other	N/A
Output	120/240 VAC 480 VAC 3-phase optional
Net Power Output (AC)	1, 5, 10, 25 kW
System Efficiency, LHV (electrical)	
LTPEM	30%
SOFC	40%
System Efficiency Overall	
LTPEM	80%
SOFC	90%
System Life	50,000 hrs
System Maintenance Interval (filter change: sulfur trap, air filter, fuel filter)	1 yr
Grid Connection	Yes, local and/or utility
Operate off-grid	Yes, critical load back-up
Start off-grid	No

جدول ۲ : پایه طراحی [45] [46]

Parameter	1 kW	5 kW	10 kW	25 kW
Cell Power Density (W/cm ²)	0.32			
Cell Current Density (A/cm ²)	0.4			
Cell Voltage (VDC)	0.7			
Active Area Per Cell (cm ²)	200	200	400	400
Rated Net Power (kW, continuous)	1	5	10	25
Rated Gross Power (kW, continuous)	1.2	6	12	30
Number of Cells (#)	21	107	107	268
Open Circuit Voltage (VDC)	24	118	118	295
Full Load Stack Voltage (VDC)	15	75	75	188
Cell Design	Planar, Anode supported			

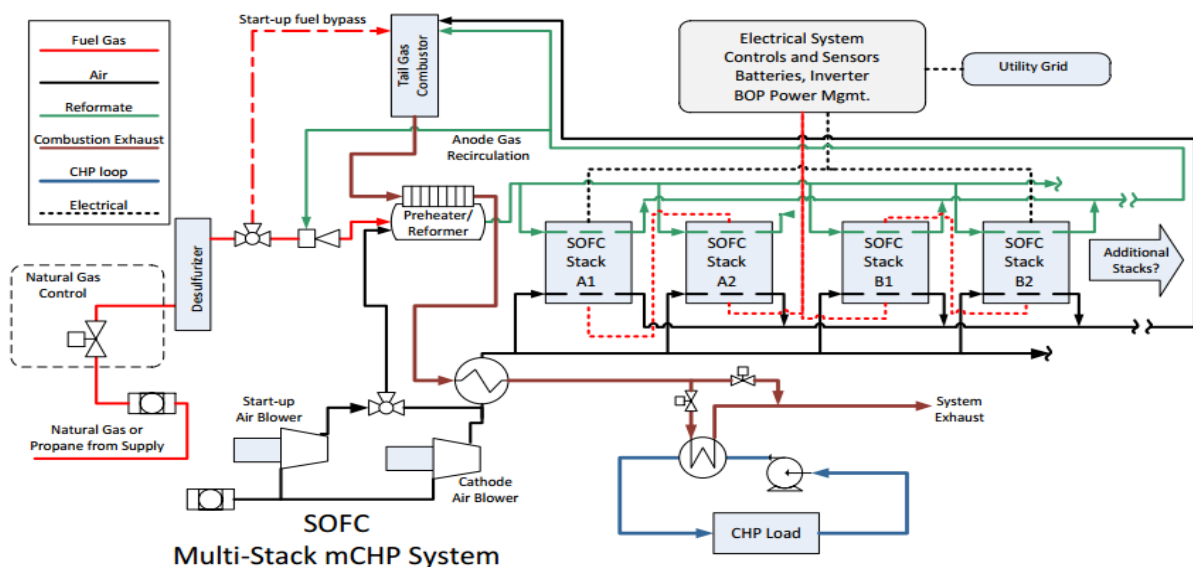
Parameter	100 kW	250 kW
Cell Power Density (W/cm ²)	0.28	
Full Load Cell Current Density (A/cm ²)	0.4	
Full Load Cell Voltage (VDC)	0.7	
Active Area Per Cell (cm ²)	414	414
System Net Power (kW, continuous)	100	250
System Gross Power (kW, continuous)	120	300
Number and Size of Stacks per System	4 x 30 kW (gross)	10 x 30 kW (gross)
Number of Cells per Stack(#)	259	259
Nominal Stack Open Circuit Voltage (VDC)	285	285
Full Load Stack Voltage (VDC)	181	181
Cell Design	Planar, Anode supported	

جدول ۳ : پارامترهای طراحی پیل سوختی اکسید جامد [45] [46]

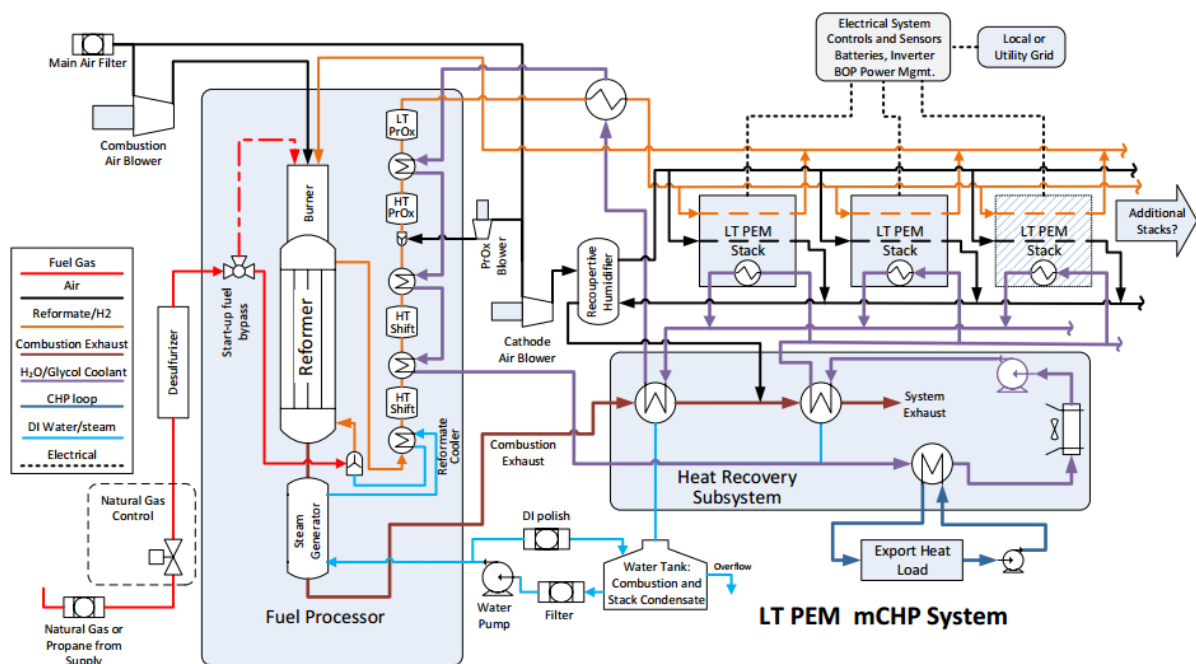
۳-۴-۵) پیکربندی سیستم

یک طرح اساسی از سیستم SOFC که در تجزیه و تحلیل هزینه‌ها استفاده می‌شود، در شکل ۲-۵ (شکل ۳-۵ PEM) نشان داده شده است. زیرمجموعه‌های اصلی عبارتند از:

- تامین سوخت: یک کمپرسور گاز طبیعی، فیلتر سوخت و راکتور جذب گوگرد. از آنجا که سیستم پیل سوختی اکسید جامد از یک educator جهت چرخش گاز آند استفاده می‌کند، فشار گاز طبیعی باید ۳۰ پوند بر اینچ مربع یا بیشتر برای همه سیستم‌ها باشد.
- پردازنده سوخت: گاز طبیعی / educator چرخش آند / مخلوط کن، تجهیزات گرمایش / اصلاح کننده، و محفظه احتراق گاز حاصل.
- تامین هوا: فیلتر و دو دمنده (راه اندازی و کاتد) و گرمایش و بهبودی کاتد.
- سیستم خروج حرارتی: گاز خروجی به مبدل حرارتی CHP و شیر بای‌پس برای مدیریت حرارت داده شده به سیستم CHP. بار گرما مستقل از سیستم پیل سوختی فرض شده است، یعنی سیستم پیل سوختی نمی‌تواند بار گرما خارجی را تنظیم کند، تنها می‌تواند به آن پاسخ دهد. بنابراین، سیستم شیر اجازه می‌دهد تا گاز خروجی دما بالا در صورت نیاز از سیستم CHP خارج شود.
- سیستم برق: باتری، کنترل کلی و مدیریت ولتاژ / جریان. سیستم الکتریکی همچنین شامل اتصال الکتریکی شبکه (اینورتر و هر گونه قطع فیزیکی مورد نیاز است). می‌باشد. سیستم الکتریکی برای هر دو سیستم LTPEM و SOFC اساساً یکسان است.



شکل ۲-۵ سیستم SOFC CHP [45] [46]



شکل ۳-۵ سیستم PEM CHP [45] [46]

همان گونه که در شکل های ۲-۵ و ۳-۵ مشاهده شد، شماییک کلی (SOFC) ساده تر از (PEM) می باشد. دلیل سادگی SOFC عبارتند از:

- بدون تغییر یا نیاز به راکتور، دمنده یا مبدل گرما PROX
- بدون نیاز به رطوبت ساز مجدد
- بدون نیاز به ژنراتور بخار
- هیچ حلقه خنک کننده مخصوص گلیکول مورد نیاز نیست.
- چند مبدل حرارتی مورد نیاز نیست.
- بدون نیاز به زیر سیستم تامین آب

سادگی نسبی از دیدگاه هزینه یک سیستم SOFC را جذاب می کند. همچنین استفاده از گرما با کیفیت بالاتر، سیستم SOFC را در گستره وسیعی از کاربردها قرار می دهد.

۵-۵) تجزیه و تحلیل هزینه تولید

۵-۵-۱) دامنه هزینه سیستم

با توجه به تفاوت‌های قابل توجه در ساخت استک و سخت افزار BOP، دو تکنولوژی به طور جداگانه در ادامه در نظر گرفته شده است. علاوه بر استک برای هر فناوری، همچنین Battelle یک طراحی برای سخت افزار پردازش سوخت را توسعه داده و از تحلیل DFMA در اصلاح‌گرها و مبدل‌های حرارتی برای هر سیستم استفاده کرده است.

۵-۵-۲) رویکرد هزینه سیستم

روش تجزیه و تحلیل هزینه‌های تولید شامل:

- توسعه مدل‌های تولیدی و برآورد هزینه برای هر جزء، فرآیند و / یا زیرمجموعه فرعی.
- تعریف مجموعه‌ای از گام‌های گسسته برای جمع آوری اجزای سازنده در زیر مجموعه‌ها و سپس سیستم کلی نهایی.
- تعریف یک احتراق درونی و توالی آزمون برای زیر مجموعه‌ها و مونتاژ کلی.
- ارزیابی هزینه‌های سرمایه مورد نیاز برای امکانات تولید.

۵-۵-۳) پیش‌بینی هزینه‌های ساخت سیستم

روند کلی فرضیات هزینه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ روند کلی مفروضات هزینه [45] [46]

Process Category	Assumed value
Energy cost	\$0.07/kWh
Labor cost	\$45.00/hr
Overall plant efficiency	85.00%

۴-۵-۵) هزینه‌های ماشین

معادله نرخ پایه دستگاه که در تجزیه و تحلیل استفاده می‌شود، تابعی از هزینه‌های سرمایه‌ای تجهیزات، هزینه‌های نیروی کار و انرژی و بهره‌برداری است.

برای هر ایستگاه تولید، استفاده به عنوان کسری از کل زمان در دسترس برای تولید حجم سالانه مورد نیاز سیستم محاسبه می‌شود. ما فرض می‌کنیم که کل زمان تولید در دسترس، شامل سه شیفت ۸ ساعته در روز برای ۲۵۰ روز در سال یا ۶۰۰۰ ساعت در سال است. کل زمان ماشین مورد نیاز برابر با محصول تعدادی از سیستم‌های تولید شده و زمان مورد نیاز برای تولید اجزای مورد نیاز برای هر سیستم است. تعداد ماشین آلات مورد نیاز از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

(۶۰۰۰ / مجموع زمان ماشین مورد نیاز) دور = تعداد ماشین آلات

۵-۵-۵) هزینه‌های مواد

هزینه مواد به ازای هر واحد (به عنوان مثال، در هر کیلوگرم در هر متر مربع) با افزایش حجم خرید کاهش می‌یابد، به دلیل اینکه تولید کننده قادر به تولید حجم زیادی از مواد از یک خط تولید است. برآورد هزینه مواد در حجم‌های مختلف گسسته می‌تواند برای حجم متوسط با استفاده از یک تحلیل منحنی تخمین زده شود.

۶-۵-۵) هزینه تولید سیستم SOFC

یک سیستم SOFC، شامل یک Stack و BOP (پردازنده سوخت، سخت افزار پشتیبانی، تامین سوخت و هوا، کنترلرها و سنسورها و تجهیزات الکتریکی) است. در این بخش در مورد فرآیند تولید استک برای دستیابی به مشخصات طراحی، ساختارهای قطعات معمول بحث می‌شود و با خلاصه‌ای از قطعات ساخته شده از سخت افزار تجاری قابل دسترس به پایان می‌رسد.

• فرآیند ساخت استک SOFC

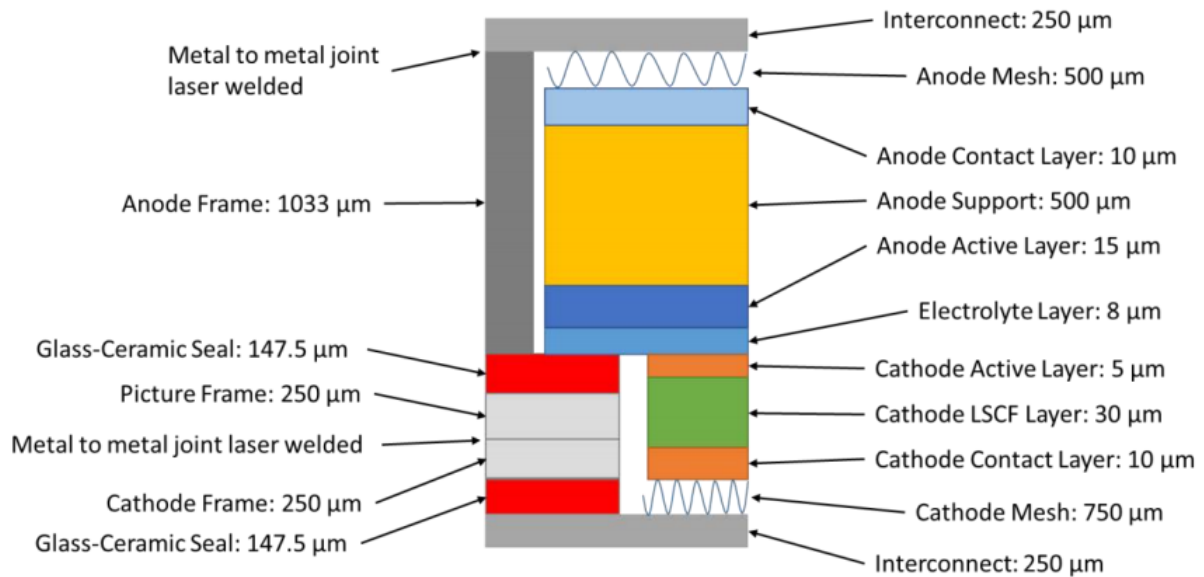
استک پیل سوختی SOFC شامل دو صفحه انتهایی و تعداد مناسبی از واحدهای تکرار شونده می‌باشد. واحدهای تکرار شونده عبارتند از:

- یک فریم اتصالی و آند (این‌ها ممکن است به یک قطعه یکپارچه منجر شوند)
- یک سلول (آند، الکترولیت، کاتد) و قاب تصویر^۱ (قاب تصویر از کل حاشیه الکترولیت پشتیبانی می‌کند)
- قاب کاتد

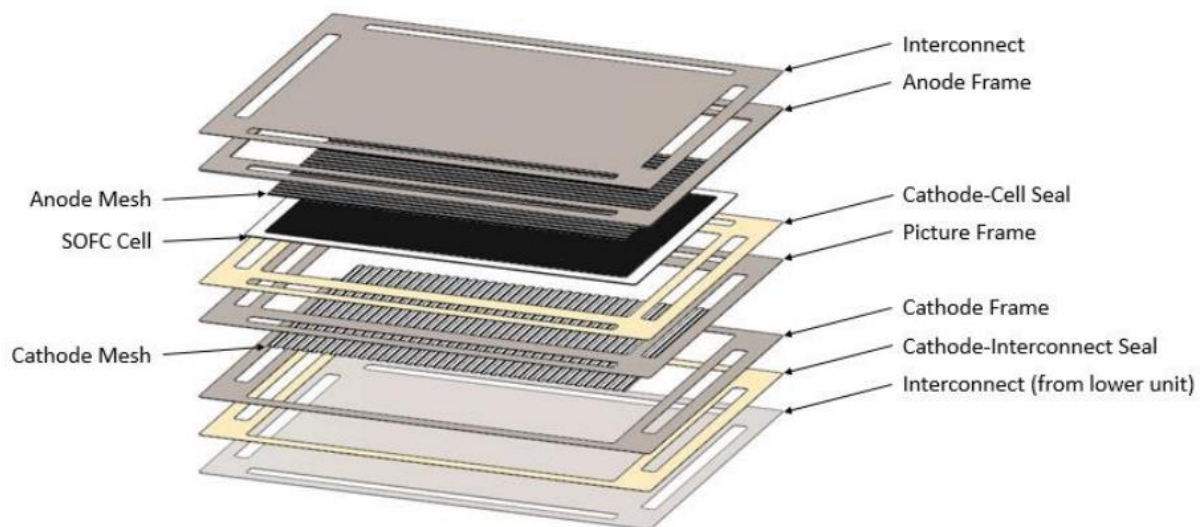
^۱ picture frame

- یک مش کاتد و یک مش آند
- اتصال بین هر قاب، سلول، و اتصال دهنده

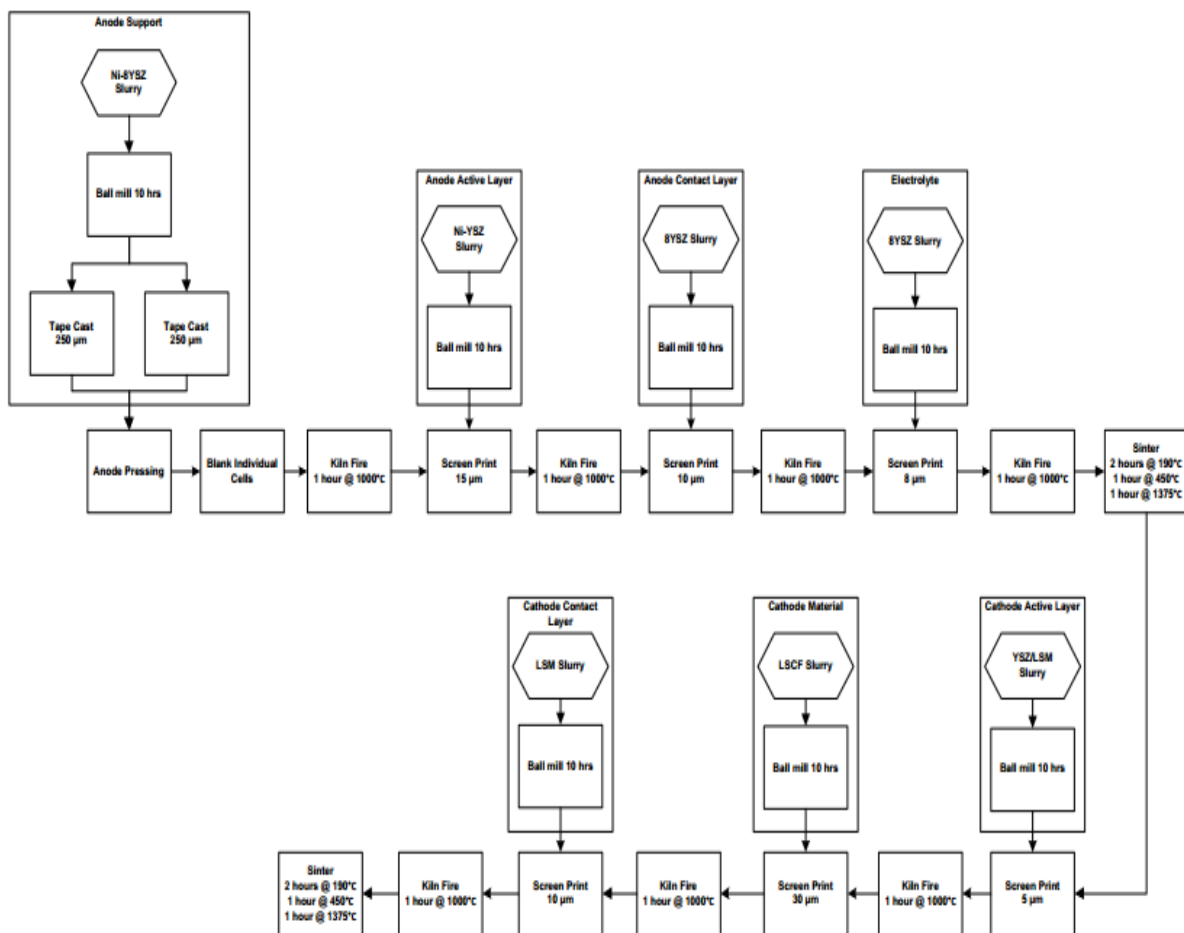
شکل ۴-۵ و شکل ۵-۵ پیکربندی و جهت گیری لایه و شکل ۶-۵ فرآیند تولید پیل SOFC را نشان می-دهد.



شکل ۴-۵ جزئیات مجموعه‌ی پیل SOFC [45]



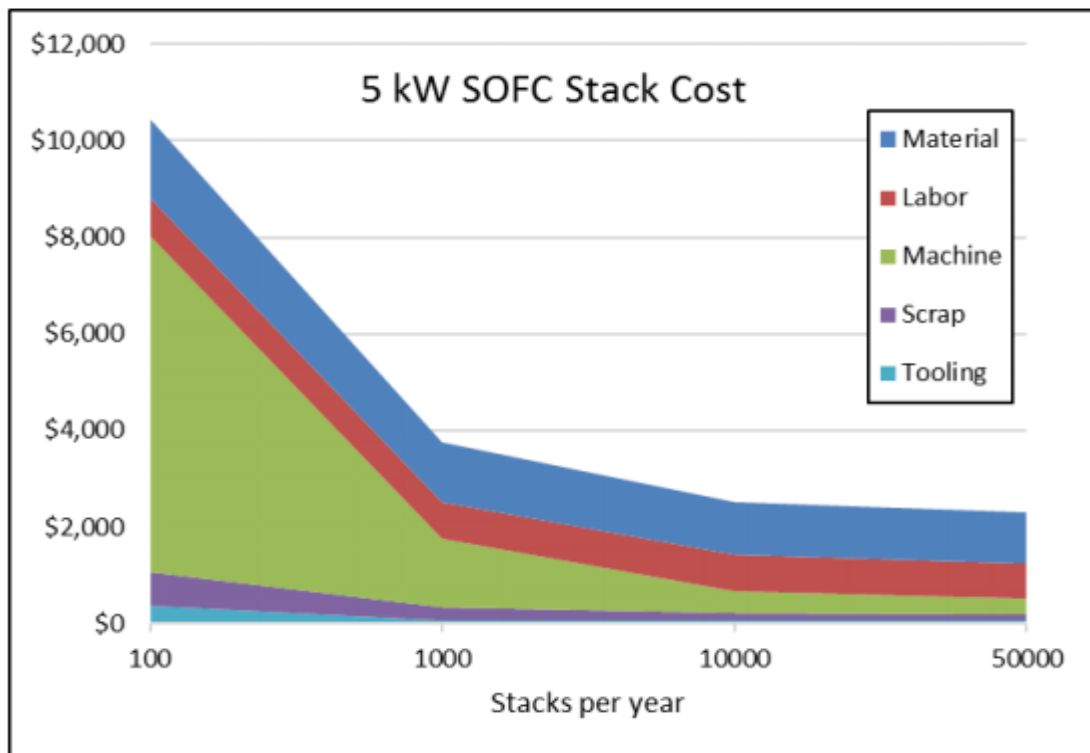
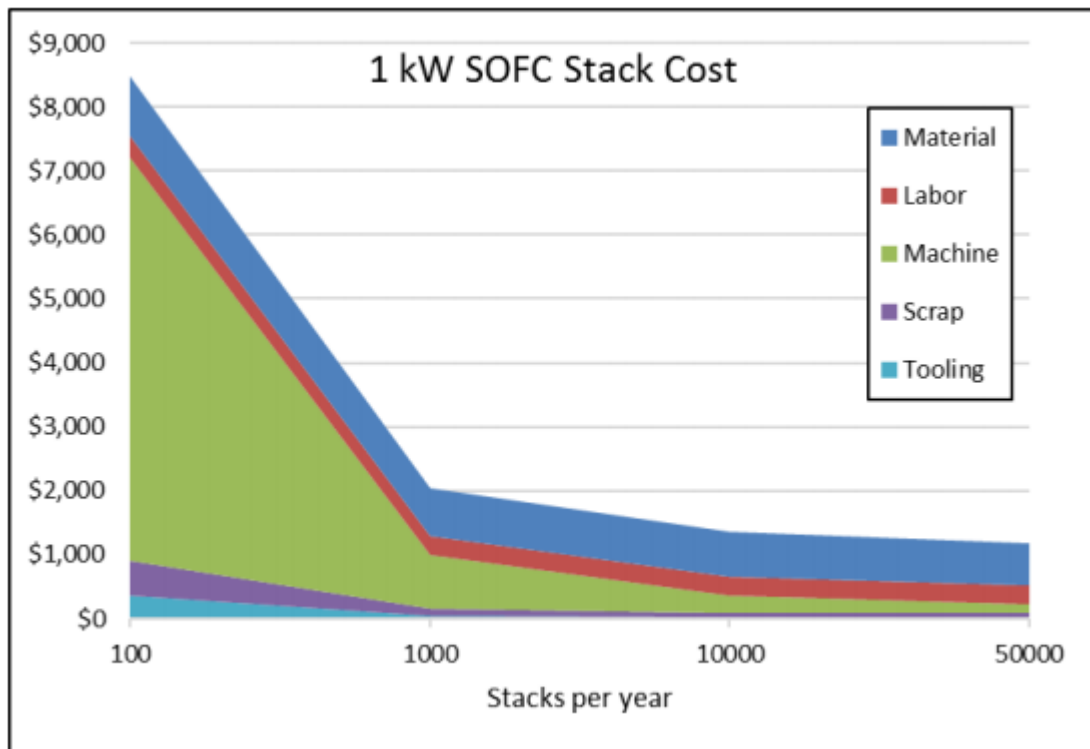
شکل ۵-۵ واحدهای تکرارشونده‌ی سلول نمایانگر قطعات اصلی [45]



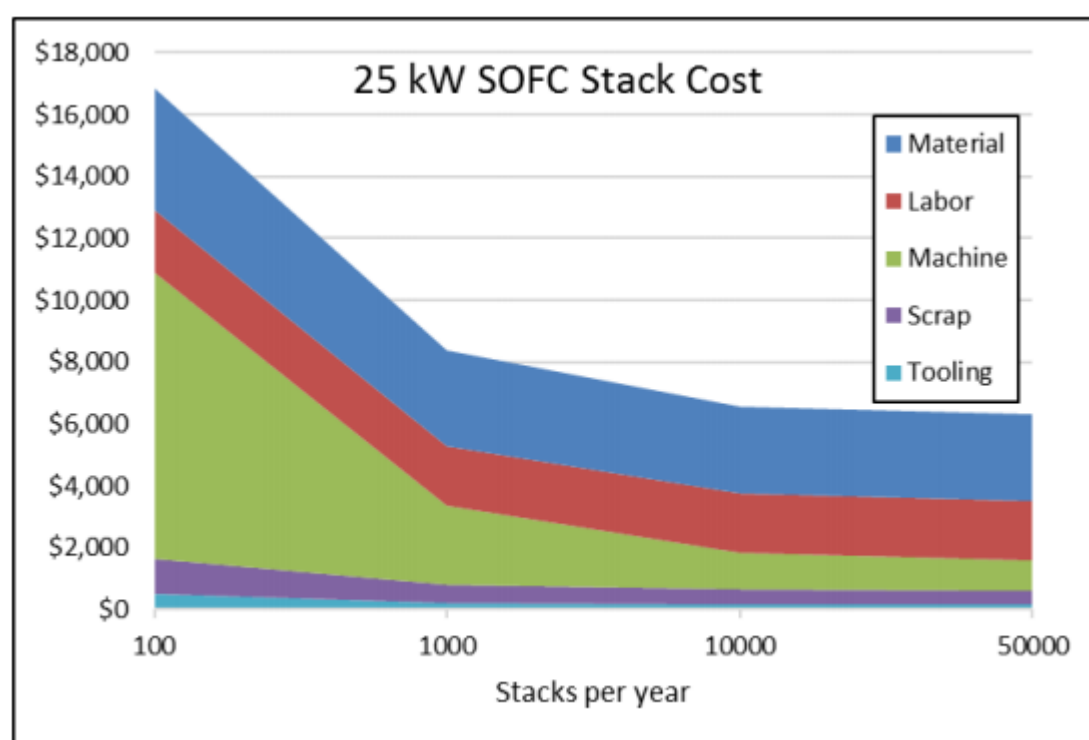
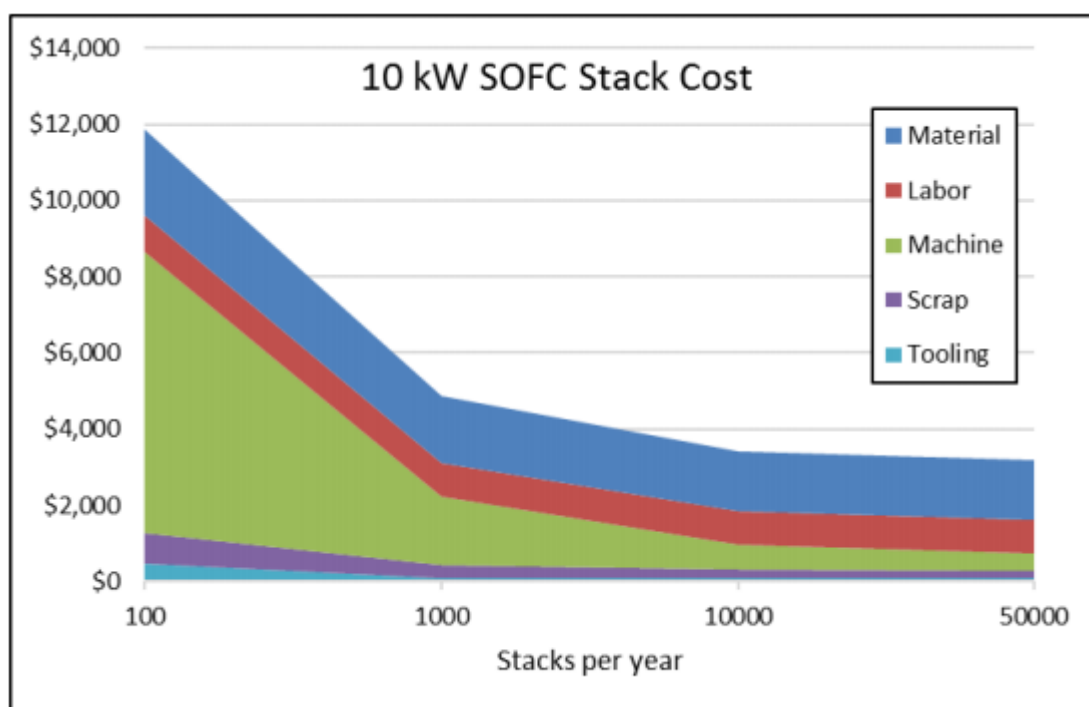
شکل ۵-۶ فرآیند تولید پیل SOFC [45]

- هزینه استک SOFC

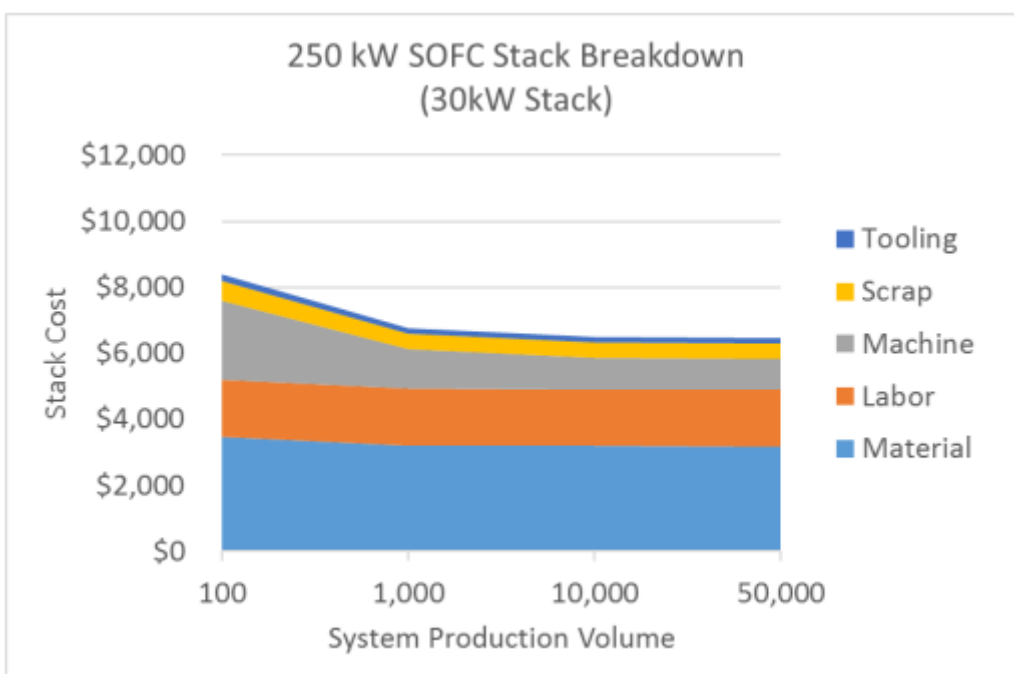
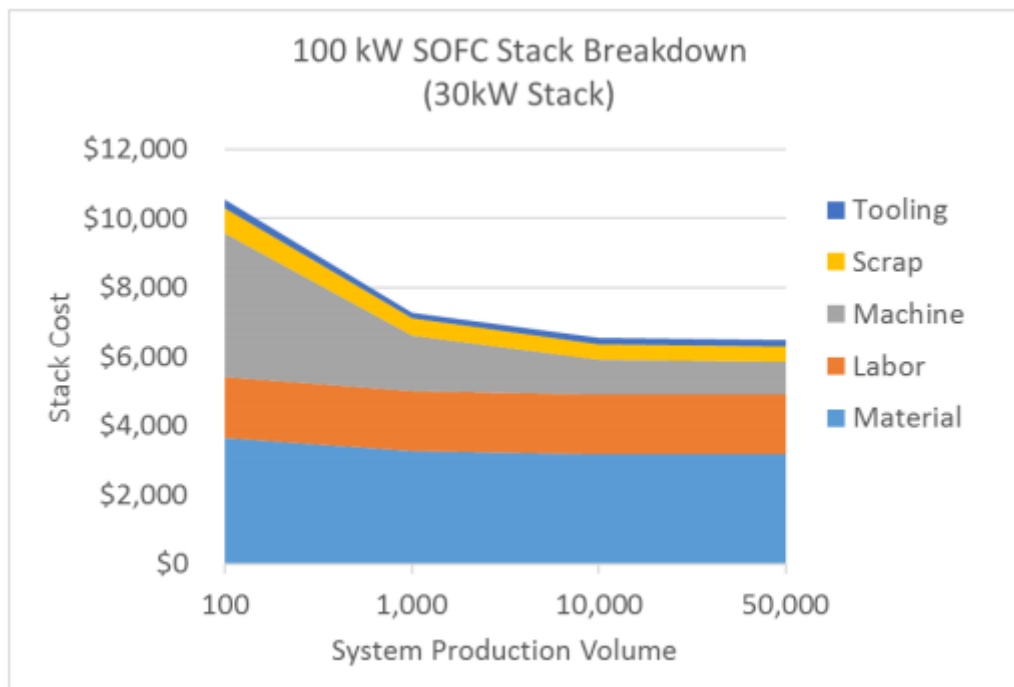
خلاصه هزینه‌های اجزا ساخت استک SOFC در شکل‌های ۷-۵ تا ۹-۵ آورده شده است.



شکل ۷-۵ شماتیک هزینه‌های استک پیل سوختی با توان ۱ و ۵ کیلووات [45]



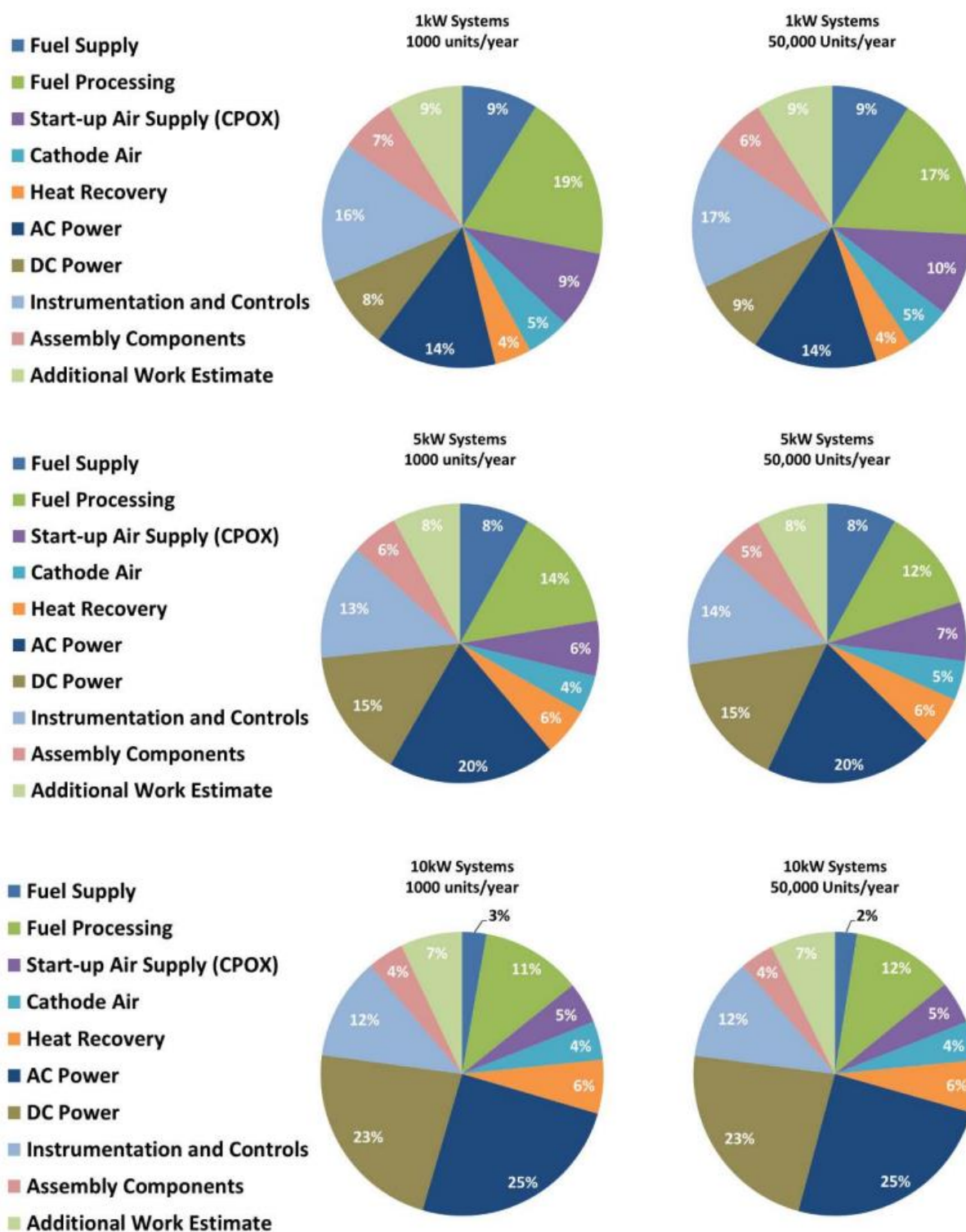
شکل ۵-۸ شماتیک هزینه‌های استک پیل سوختی با توان ۱۰ و ۲۵ کیلووات [45]



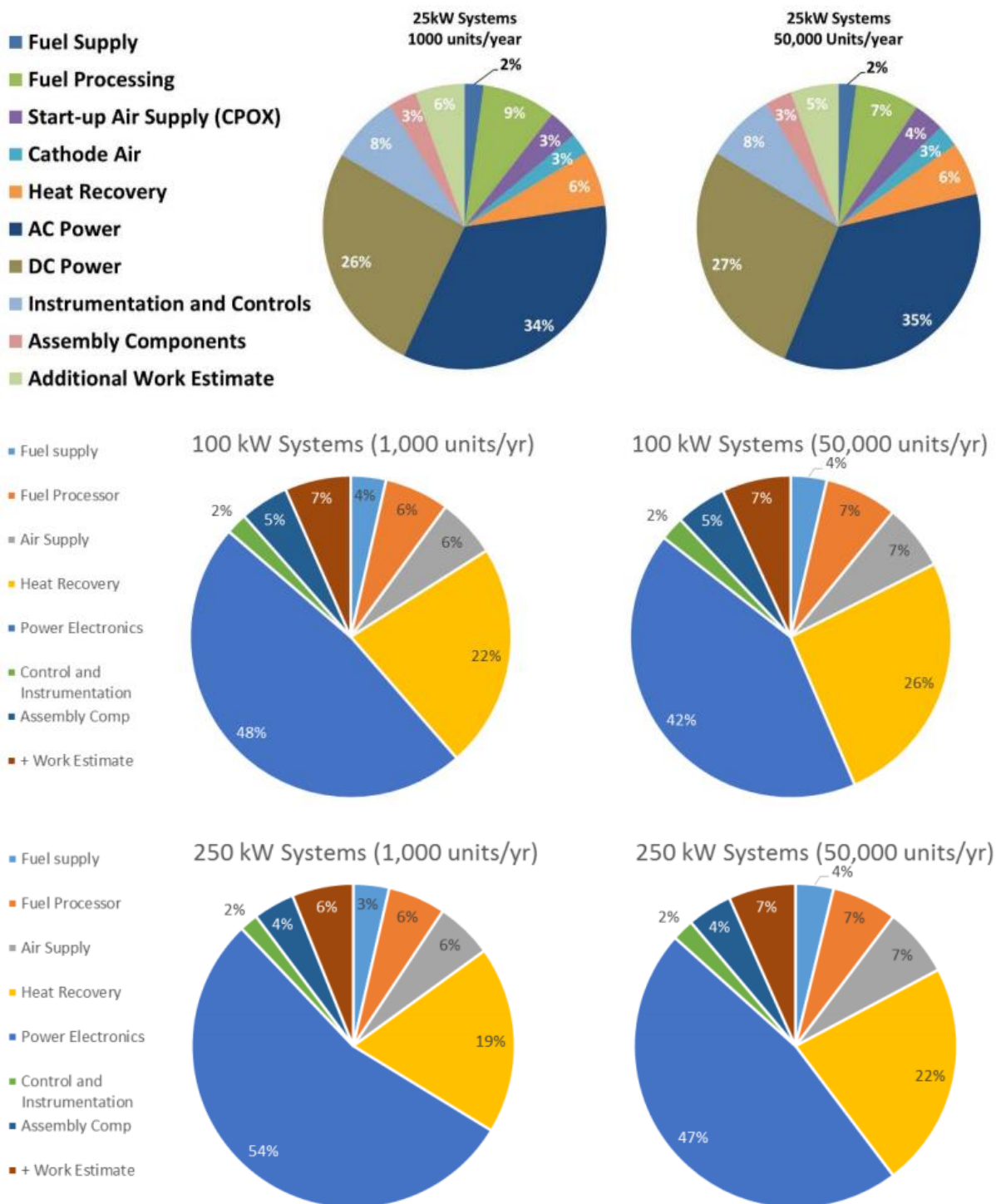
شکل ۹-۵ شماتیک هزینه‌های استک پیل سوختی با توان ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات [46]

• مفروضات هزینه BOP، سیستم SOFC

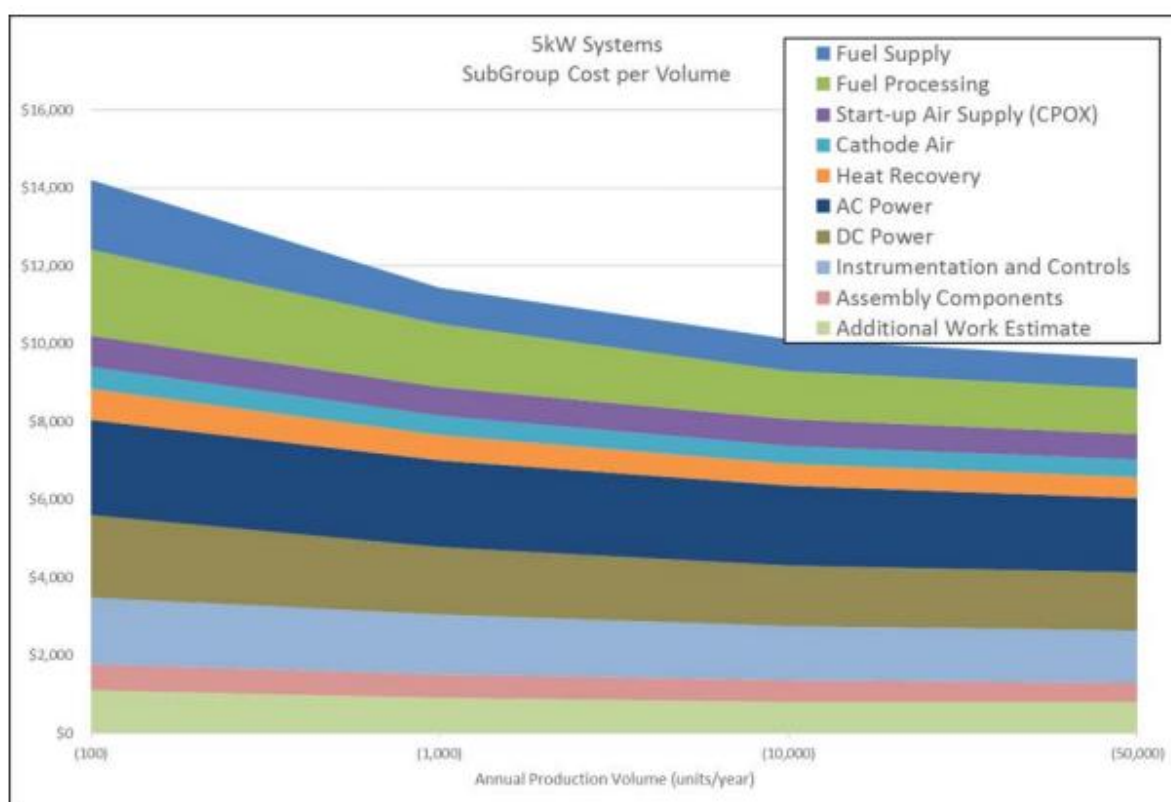
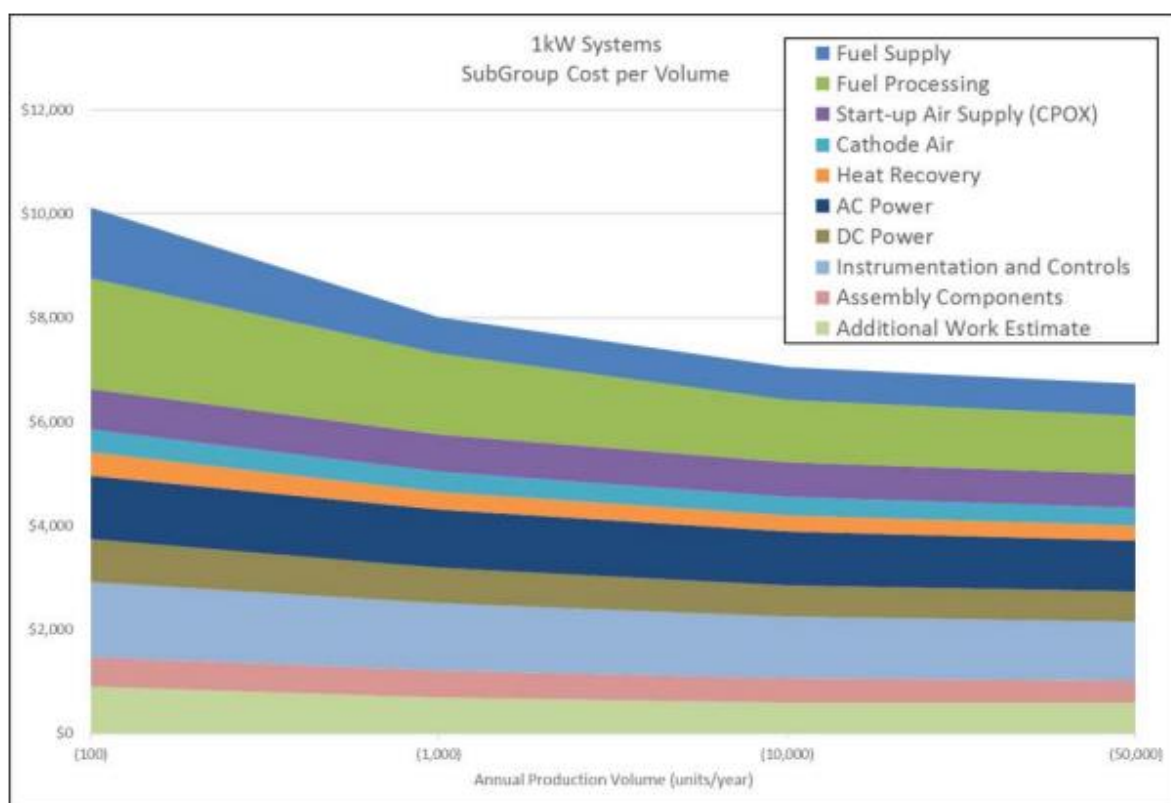
هزینه‌های مربوط به اجزای BOP در شکل‌های ۵-۱۰ و ۵-۱۱ توزیع هزینه‌های BOP به صورت نمادی آورده شده است. در انتها هزینه‌ها به صورت نمودار حجمی در شکل‌های ۵-۱۲ تا ۵-۱۴ آورده شده است.



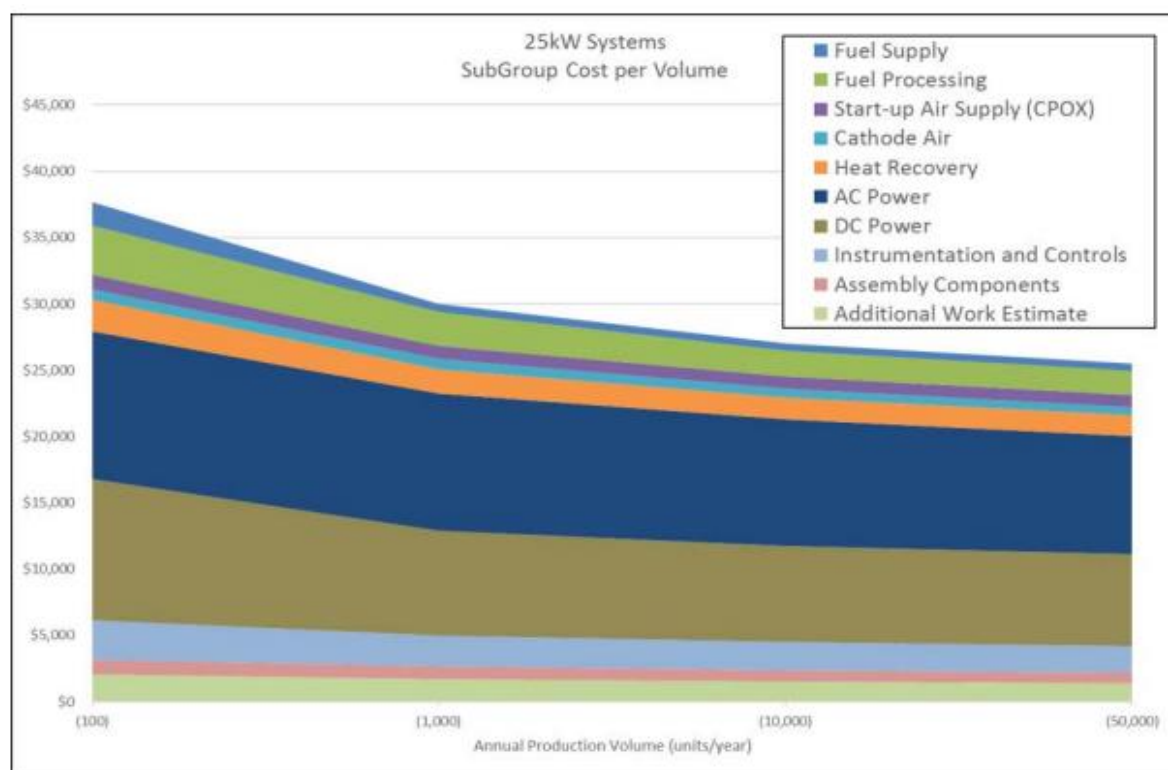
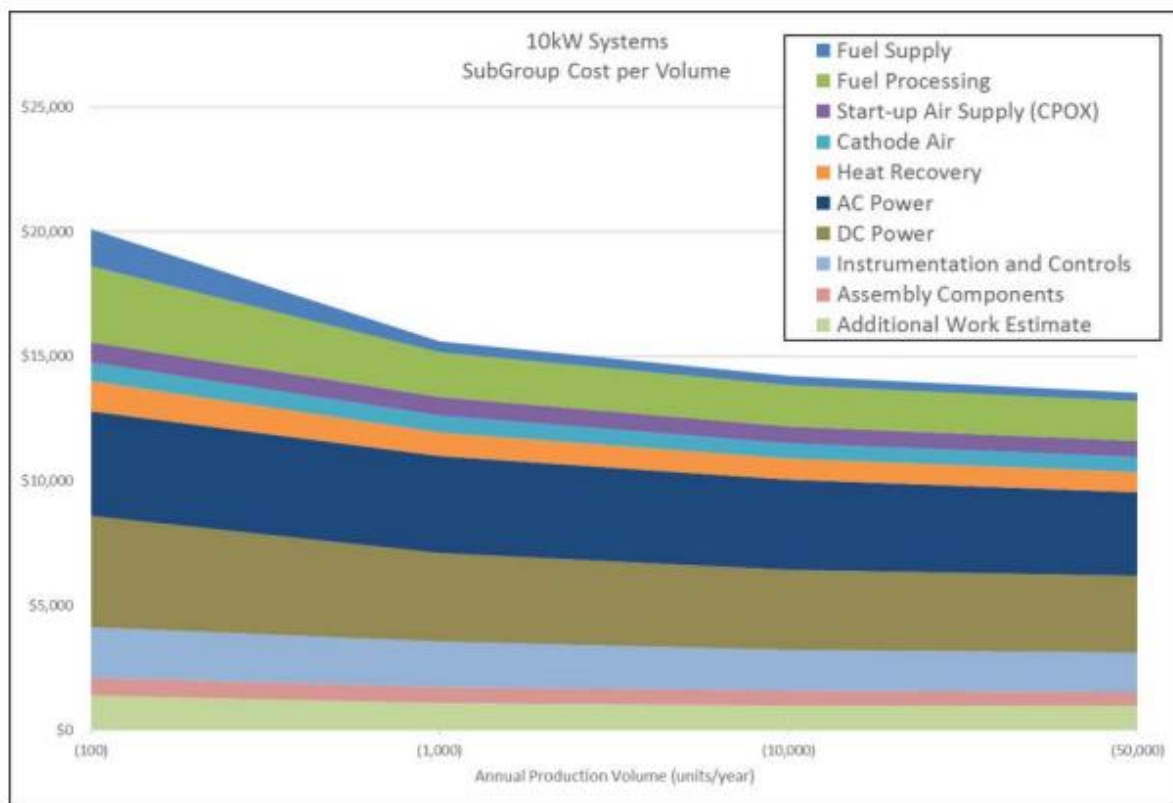
شکل ۵-۱۰ توزیع هزینه‌های ۱ و ۵ و ۱۰ کیلووات [45]



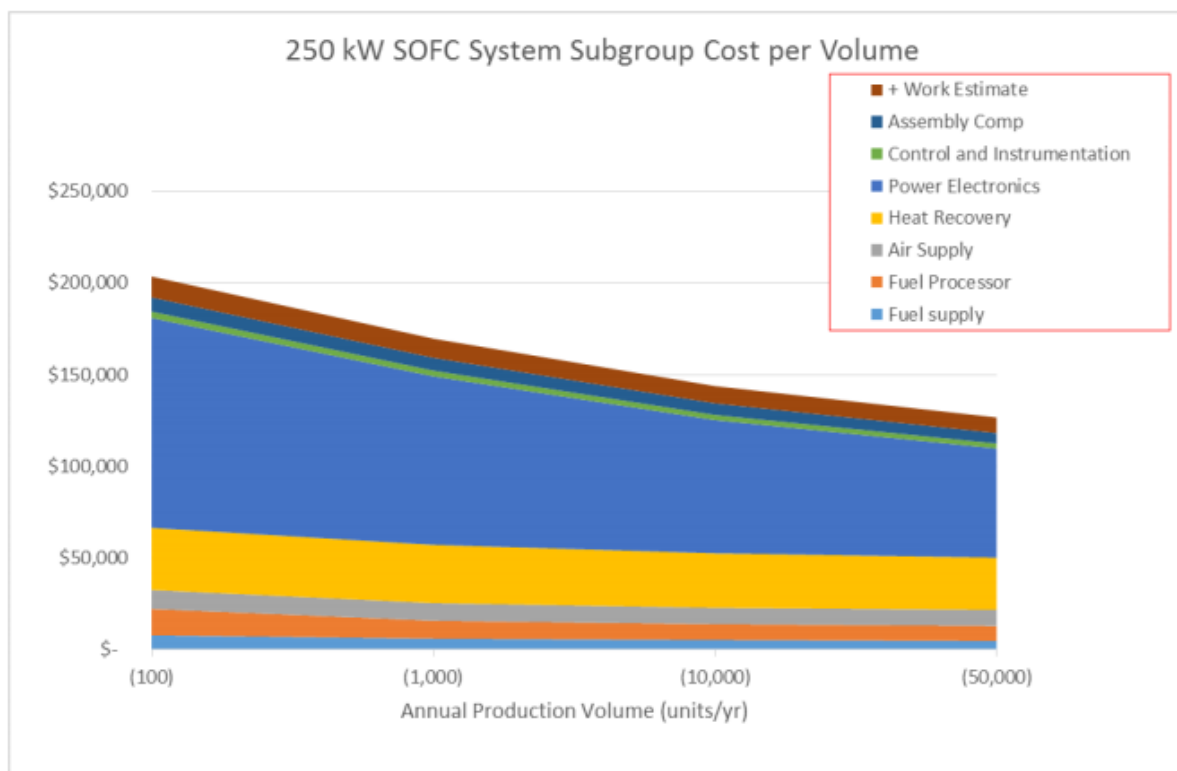
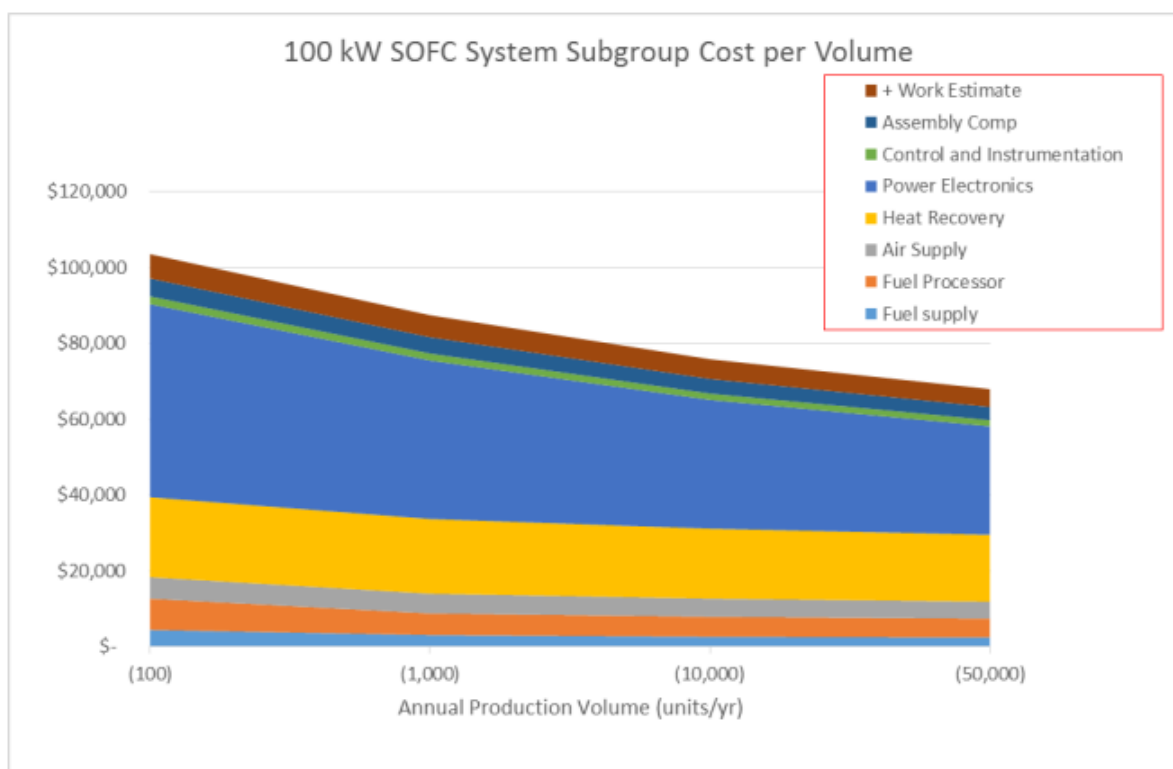
شکل ۱۱-۵ توزیع هزینه‌های ۲۵ و ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات [45] [46]



شکل ۵-۱۲ توزیع هزینه‌ها به صورت حجمی ۱ و ۵ کیلووات [45]



شکل ۵-۱۳ توزیع هزینه‌ها به صورت حجمی ۱۰ و ۲۵ کیلووات [45]



شکل ۵-۱۴ توزیع هزینه‌ها به صورت حجمی ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات [46]

- مفروضات هزینه‌ی سیستم الکتریکی

هزینه‌های سیستم الکتریکی عمدتاً الکترونیک قدرت (DC/DC converter and DC/AC inverter) است. در مرتبه بعدی، کنترل‌کننده سیستم و سنسورها بزرگترین بخش از هزینه را شامل می‌شوند. دستگاه‌های حفاظتی و اجزای اتصال‌دهنده باقی مانده هزینه‌های سیستم الکتریکی را کامل می‌کنند.

جدول ۵ هزینه مبدل DC/DC در هر وات [45]

	Number of Units			
	100	1,000	10,000	50,000
Power (W)	\$/W			
1,200	0.67	0.54	0.48	0.46
6,000	0.33	0.26	0.24	0.23
12,000	0.33	0.25	0.23	0.22
30,000	0.33	0.24	0.22	0.21

جدول ۶ هزینه مبدل DC/AC در هر وات [45]

	Number of Units				
	1	100	1,000	10,000	50,000
Power (W)	\$/W				
1,200	\$0.60	\$0.54	\$0.50	\$0.47	\$0.43
6,000	\$0.37	\$0.33	\$0.31	\$0.29	\$0.27
12,000	\$0.33	\$0.30	\$0.28	\$0.26	\$0.24
30,000	\$0.32	\$0.29	\$0.27	\$0.25	\$0.23

جدول ۷ هزینه مبدل هیبریدی دارای ۳ Port DC/AC در هر وات [45]

	Number of Units			
	100	1,000	10,000	50,000
Power (W)	(\$/W)			
30,000	\$0.45	\$0.42	\$0.39	\$0.36

۵-۶) محدودیت‌های آنالیز

۵-۶-۱) هزینه‌های تولید استک SOFC

هزینه‌های استک SOFC بر اساس استفاده از فرآیندهای تولید معمول برای ساخت سلول‌های فردی است. این‌ها شامل ایجاد supporting anode، cell blanking، ceramic layer deposition، kiln، sintering و firing می‌باشند (جدول ۸).

جدول ۸ تخمین فرایند تولید استک SOFC [45]

Process	Method Evaluated	Alternatives Not Evaluated
Ceramic deposition	Screen printing	Plasma spray coating
	Tape casting	
Interconnect	Sheet metal stamping, laser etching	Laser cutting, water jet cutting, chemical etching
	Spray deposition coating	CVD/PVD
Sealing	Bead deposition	Screen printing, tape casting
Picture frame	Sheet metal stamping	Laser cutting, water jet cutting.
End plate	Die casting + final machining	Stamping, welding
	Machine from block (not chosen)	

۵-۷) تجزیه و تحلیل هزینه

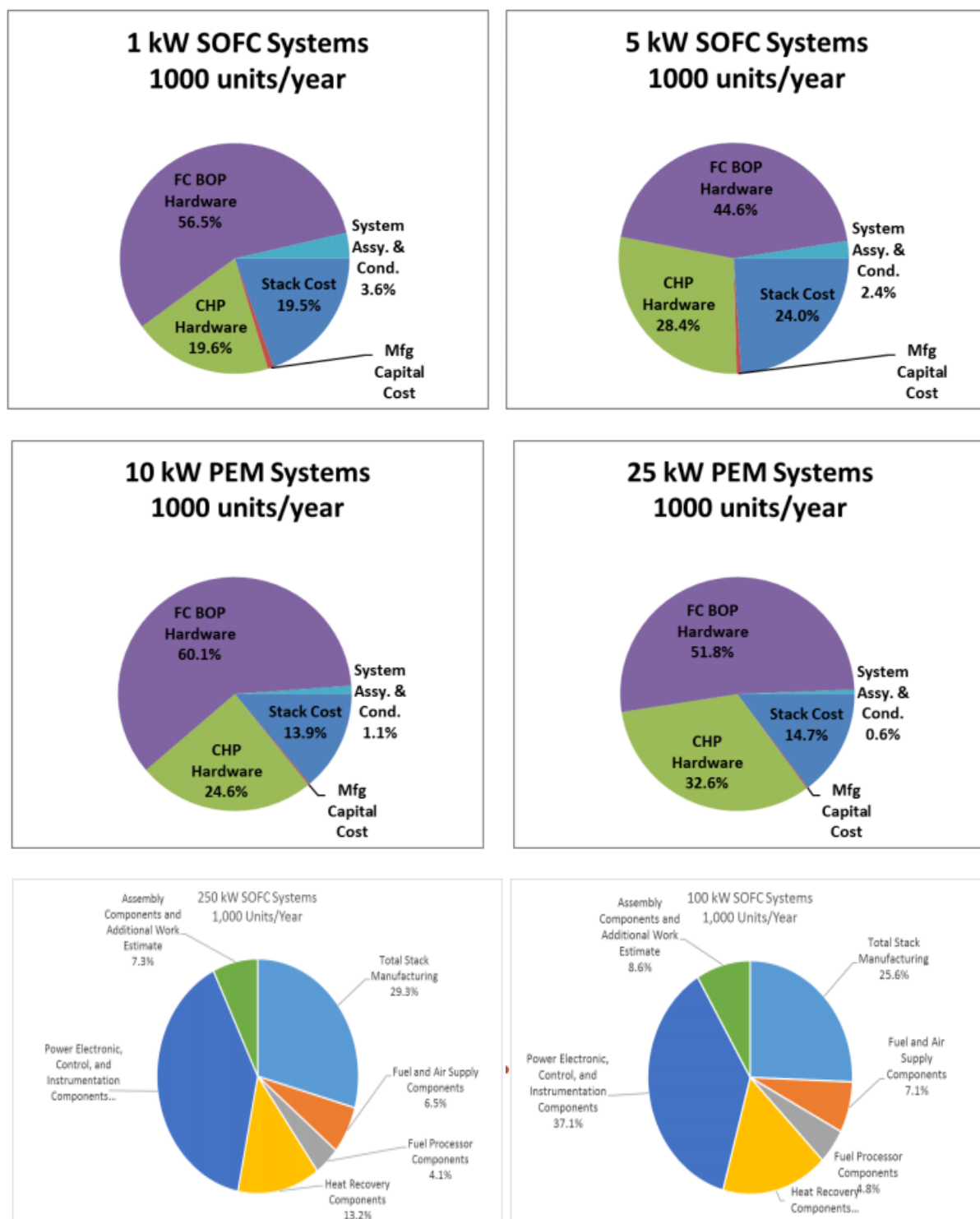
در این بخش، ما یک دید کلی از هزینه‌های سیستم را ارائه می‌دهیم. برای ارائه بینش کلی هزینه‌های اجزای BOP مرتبط با حرارت و قدرت جدا در نظر گرفته شده است. از آنجا که سوخت برای این سیستم‌های سلولی سوختی گاز طبیعی یا پروپان است، اصلاح سوخت به عنوان بخشی از سخت افزار BOP سلول سوختی محسوب می‌شود.

هزینه CHP BOP توسط الکترونیک قدرت - مبدل DC / DC و اینورتر DC / AC غالب می‌باشد. این اجزا بیشتر هزینه‌ی کل سیستم را شامل می‌شوند زیرا هزینه‌های استک با افزایش حجم، کاهش می‌یابد. این روند برای سیستم‌های PEM و SOFC حفظ می‌شود. هزینه‌های استک، به دلیل افزایش حجم تولید، کاهش می‌یابد.

۵-۷-۱) سیستم‌های CHP SOFC

این بخش نتایج تجزیه و تحلیل ۴ حجم تولید را برای سیستم‌های SOFC CHP، ۱، ۵، ۱۰، ۲۵، ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات، که شامل استک سلول سوختی، BOP و هزینه‌های کل سیستم را ارائه می‌دهد. شکل ۵-۱۵ توزیع هزینه‌های هر سایز را برای حجم تولید ۱۰۰۰ واحد در سال نشان می‌دهد. در SOFC BOP هر دو

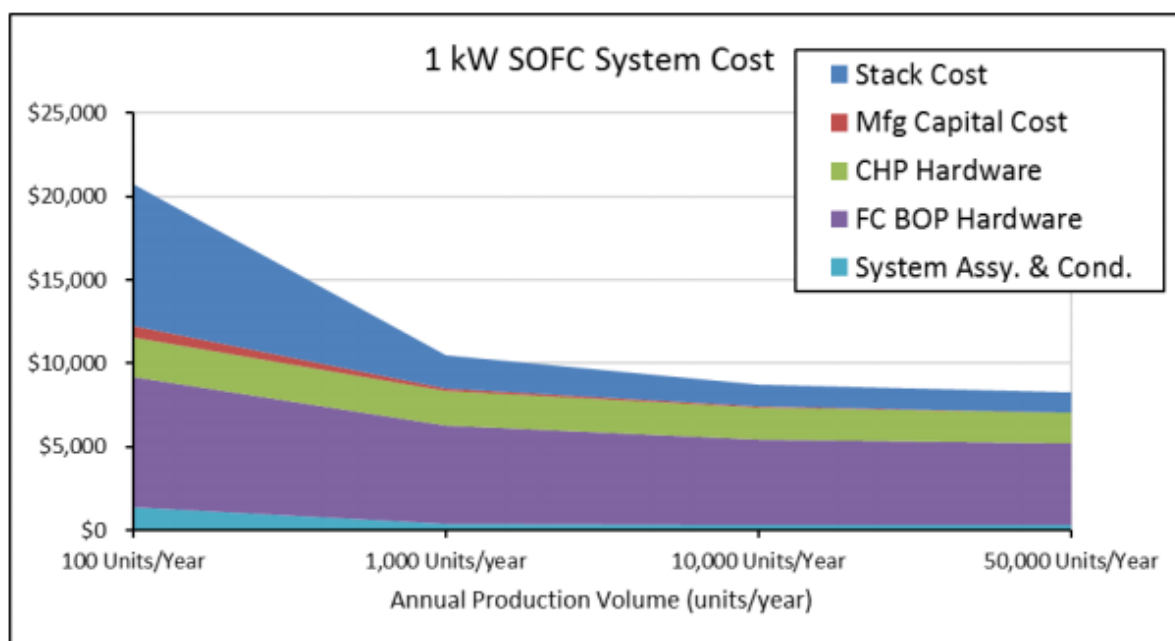
بخش CHP و سخت افزار مرتبط با پیل سوختی ساده‌تر از سیستم های PEM می باشد و مزایای قابل توجهی را در هزینه‌های کلی به ویژه در حجم کم و اندازه‌های کوچک دارد.



شکل ۵-۱۵ هزینه‌ی سیستم SOFC برای ۱ تا ۲۵۰ کیلووات برای حجم تولید ۱۰۰۰ واحد در سال [45] [46]

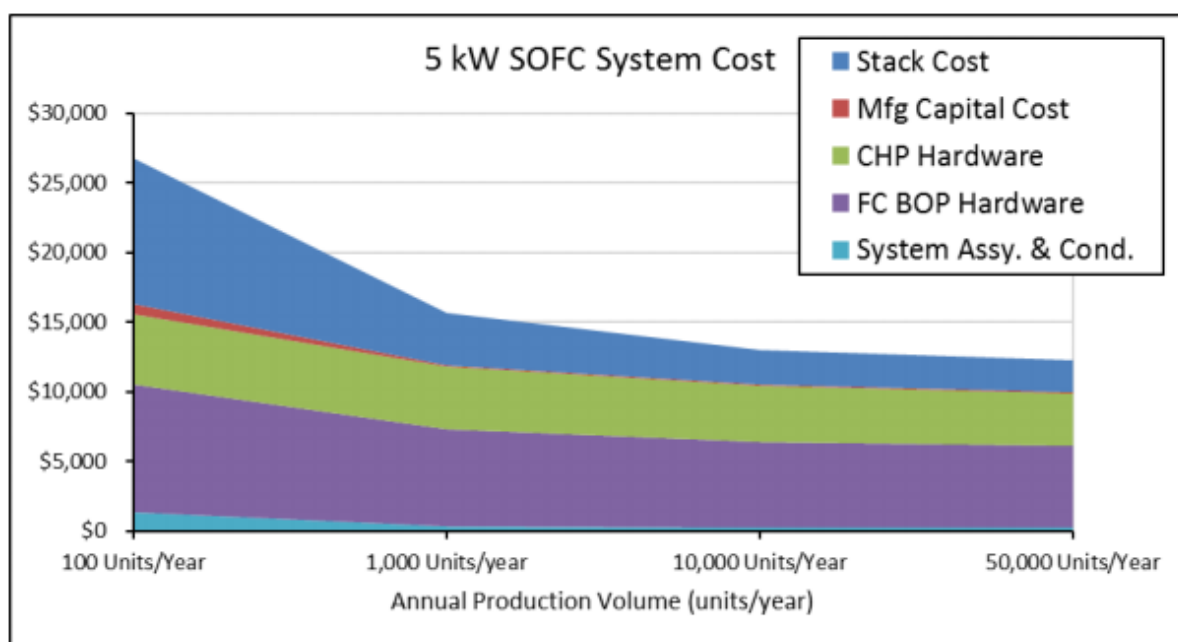
هزینه سرمایه تولید (سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای تولید سیستم‌ها) بر اساس هر استک حتی برای تعداد محدودی از واحدها نسبتاً کوچک است. از این رو، سرمایه‌گذاری پایه برای تمام اندازه‌ها و حجم‌ها وجود دارد.

Description		100 Units/Yr	1,000 Units/Yr	10,000 Units/Yr	50,000 Units/Yr
Subassembly Component Costs	Total stack manufacturing cost, with scrap	\$8,483	\$2,048	\$1,360	\$1,183
	Stack manufacturing capital cost	\$748	\$90	\$37	\$34
	CHP hardware	\$2,348	\$2,069	\$1,895	\$1,790
	FC BOP hardware	\$7,774	\$5,944	\$5,166	\$4,936
	System assembly, test, and conditioning	\$1,407	\$378	\$310	\$309
Total System Costs	Total system cost, pre-markup	\$20,760	\$10,528	\$8,768	\$8,253
	System cost per kW _{net} , pre-markup	\$20,760	\$10,528	\$8,768	\$8,253
	Sales markup	50%	50%	50%	50%
	Total system cost, with markup	\$31,139	\$15,791	\$13,153	\$12,379
	System cost per kW _{net} , with markup	\$31,139	\$15,791	\$13,153	\$12,379



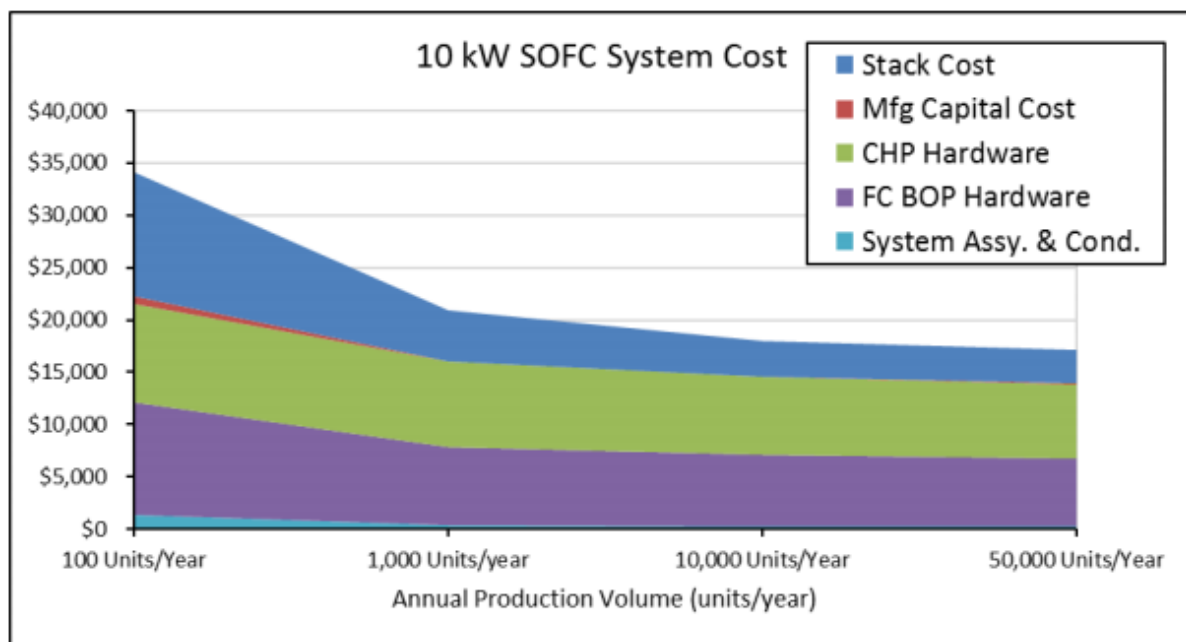
شکل ۵-۱۶ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۱ کیلووات [45]

Description		100 Units/Yr	1,000 Units/Yr	10,000 Units/Yr	50,000 Units/Yr
Subassembly Component Costs	Total stack manufacturing cost, with scrap	\$10,438	\$3,762	\$2,514	\$2,316
	Stack manufacturing capital cost	\$748	\$99	\$65	\$56
	CHP hardware	\$5,112	\$4,456	\$4,054	\$3,838
	FC BOP hardware	\$9,093	\$6,995	\$6,067	\$5,790
	System assembly, test, and conditioning	\$1,410	\$381	\$313	\$313
Total System Costs	Total system cost, pre-markup	\$26,802	\$15,693	\$13,013	\$12,313
	System cost per kW _{net} , pre-markup	\$5,360	\$3,139	\$2,603	\$2,463
	Sales markup	50%	50%	50%	50%
	Total system cost, with markup	\$40,203	\$23,540	\$19,519	\$18,469
	System cost per kW _{net} , with markup	\$8,041	\$4,708	\$3,904	\$3,694



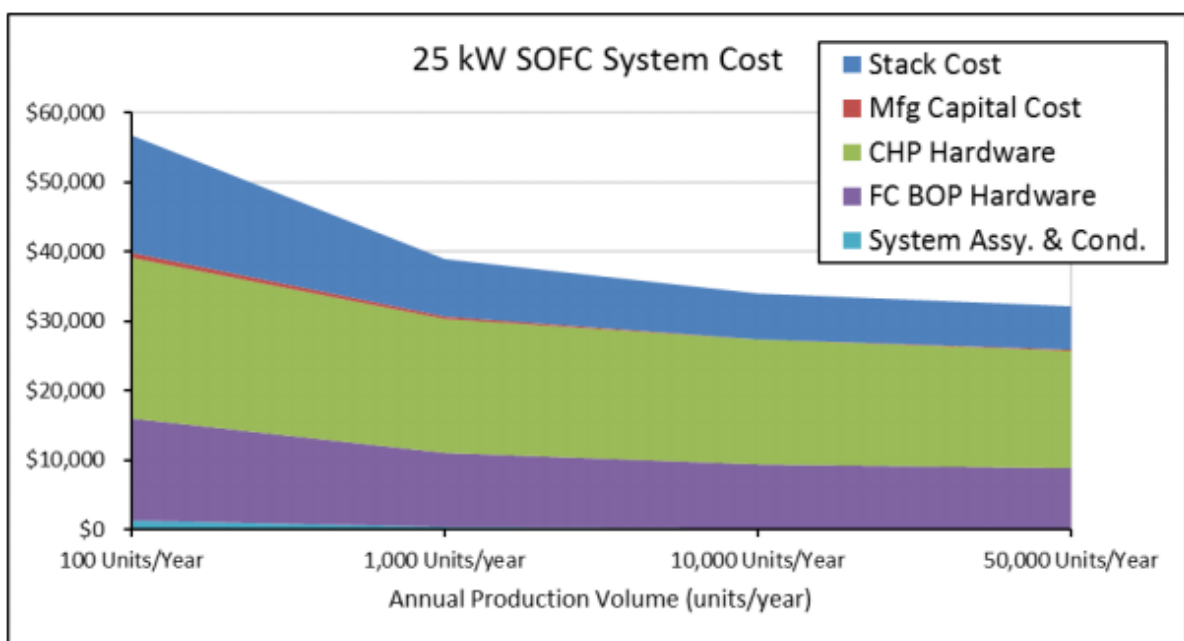
شکل ۵-۱۷ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۵ کیلووات [45]

Description		100 Units/Yr	1,000 Units/Yr	10,000 Units/Yr	50,000 Units/Yr
Subassembly Component Costs	Total stack manufacturing cost, with scrap	\$11,880	\$4,879	\$3,429	\$3,190
	Stack manufacturing capital cost	\$748	\$99	\$77	\$69
	CHP hardware	\$9,436	\$8,117	\$7,452	\$7,067
	FC BOP hardware	\$10,658	\$7,482	\$6,753	\$6,471
	System assembly, test, and conditioning	\$1,415	\$386	\$317	\$317
Total System Costs	Total system cost, pre-markup	\$34,137	\$20,963	\$18,029	\$17,114
	System cost per kW _{net} , pre-markup	\$3,414	\$2,096	\$1,803	\$1,711
	Sales markup	50%	50%	50%	50%
	Total system cost, with markup	\$51,206	\$31,444	\$27,043	\$25,671
	System cost per kW _{net} , with markup	\$5,121	\$3,144	\$2,704	\$2,567



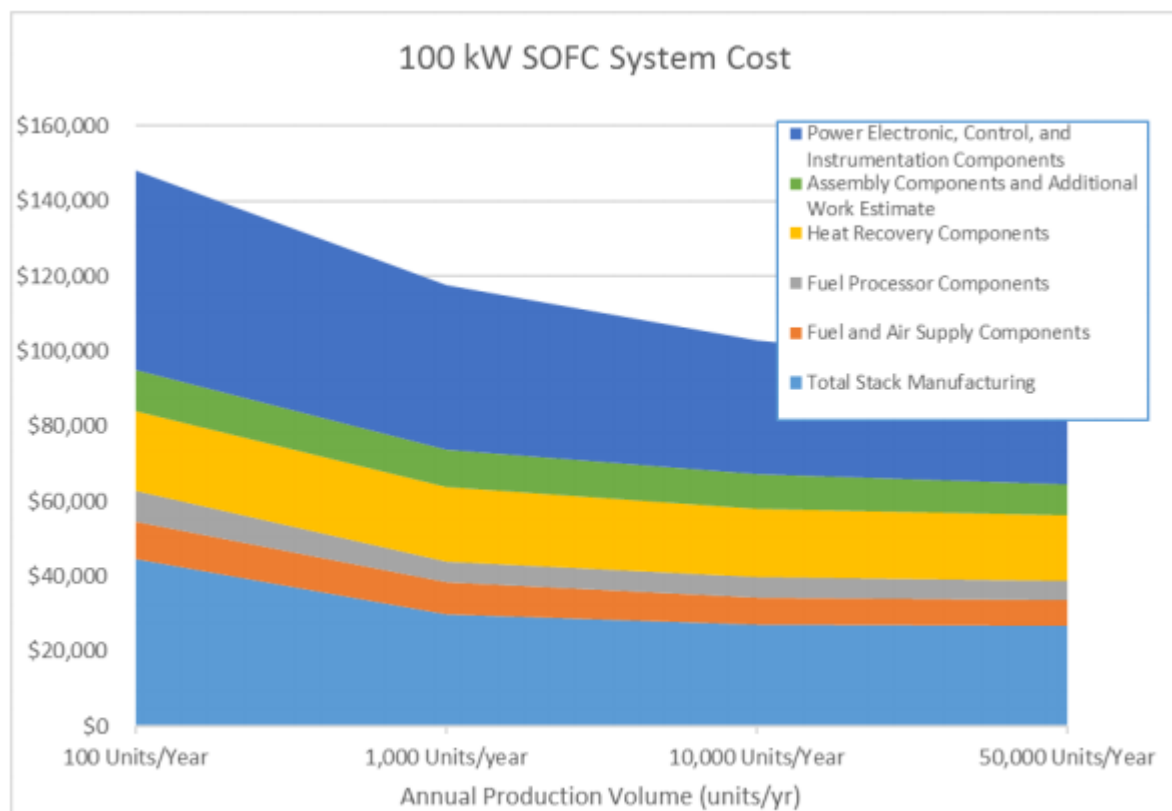
شکل ۵-۱۸ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۱۰ کیلووات [۴۵]

Description		100 Units/Yr	1,000 Units/Yr	10,000 Units/Yr	50,000 Units/Yr
Subassembly Component Costs	Total stack manufacturing cost, with scrap	\$16,848	\$8,358	\$6,555	\$6,302
	Stack manufacturing capital cost	\$748	\$209	\$135	\$126
	CHP hardware	\$23,134	\$19,433	\$17,939	\$16,939
	FC BOP hardware	\$14,548	\$10,581	\$9,073	\$8,532
	System assembly, test, and conditioning	\$1,428	\$399	\$330	\$330
Total System Costs	Total system cost, pre-markup	\$56,706	\$38,980	\$34,032	\$32,229
	System cost per kW _{net} , pre-markup	\$2,268	\$1,559	\$1,361	\$1,289
	Sales markup	50%	50%	50%	50%
	Total system cost, with markup	\$85,059	\$58,470	\$51,048	\$48,344
	System cost per kW _{net} , with markup	\$3,402	\$2,339	\$2,042	\$1,934



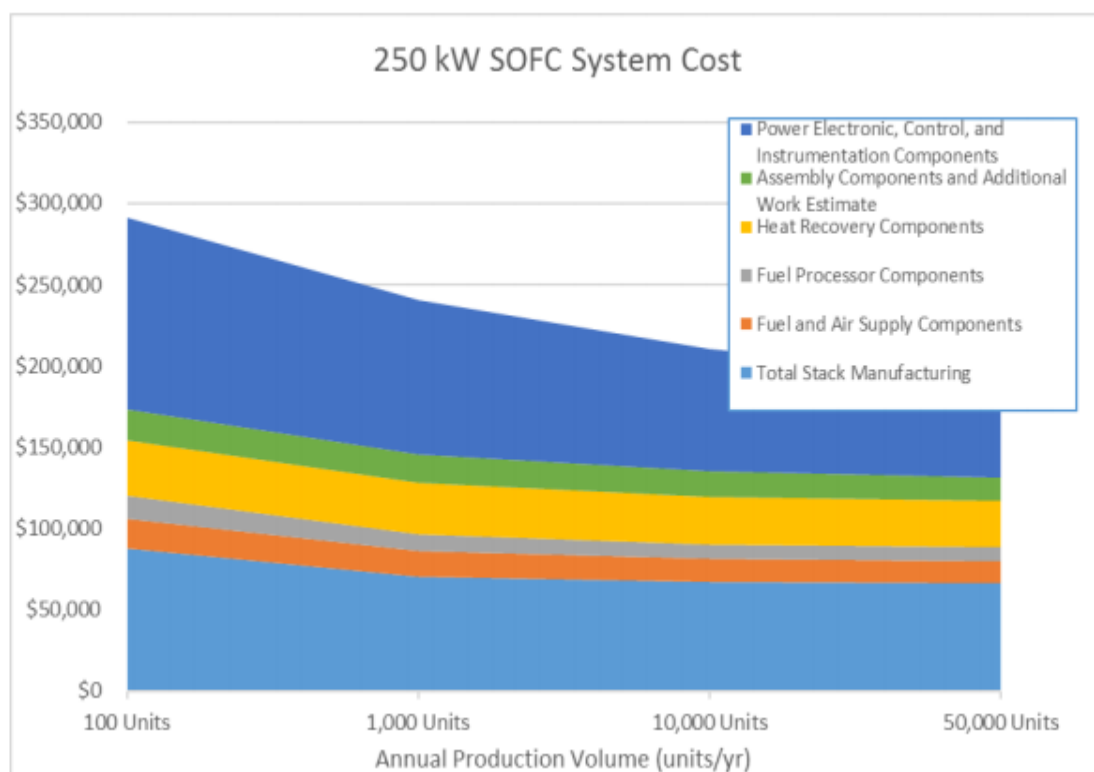
شکل ۵-۱۹ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۲۵ کیلووات [45]

Description	100 Units/Yr	1,000 Units/Yr	10,000 Units/Yr	50,000 Units/Yr
Total Stack Manufacturing	\$44,555	\$30,081	\$27,017	\$26,746
Fuel and Air Supply Components	\$10,108	\$8,306	\$7,465	\$6,956
Fuel Processor Components	\$8,245	\$5,693	\$5,247	\$4,962
Heat Recovery Components	\$21,057	\$19,698	\$18,430	\$17,621
Power Electronic, Control, and Instrumentation Components	\$52,988	\$43,627	\$35,622	\$30,213
Assembly Components and Additional Work Estimate	\$11,105	\$10,080	\$9,055	\$8,175
Total system cost, pre-markup	\$148,058	\$117,486	\$102,835	\$94,673
System cost per kW _{net} , pre-markup	\$1,481	\$1,175	\$1,028	\$947
Sales markup	50%	50%	50%	50%
Total system cost, with markup	\$222,087	\$176,229	\$154,252	\$142,009
System cost per kW _{net} , with markup	\$2,221	\$1,762	\$1,543	\$1,420



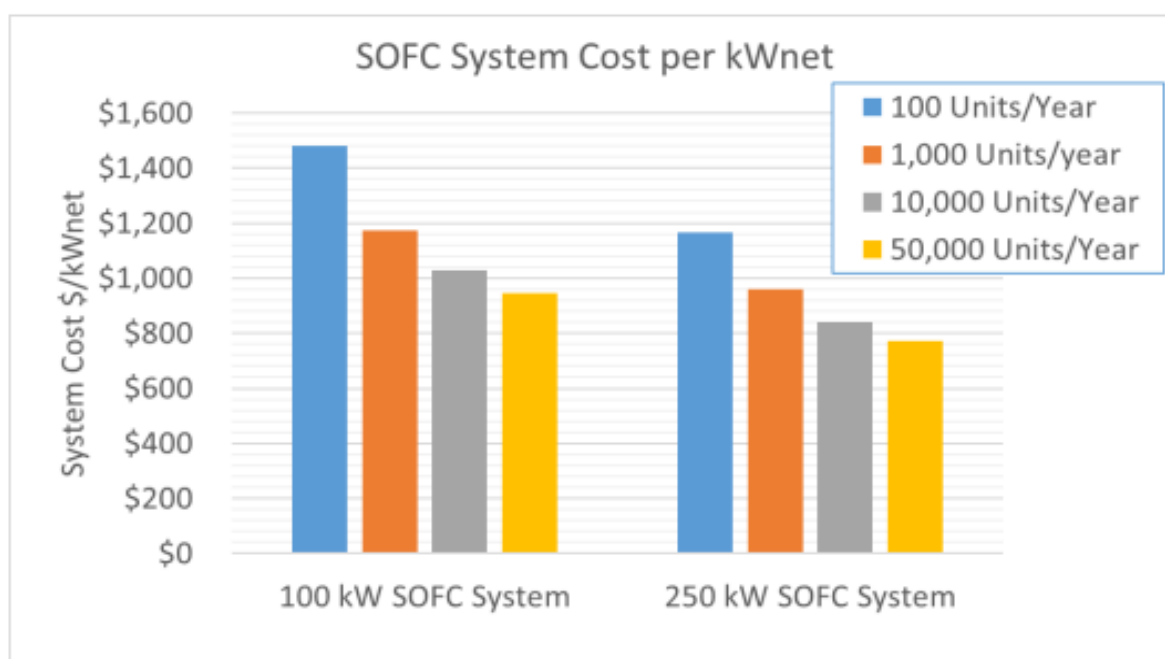
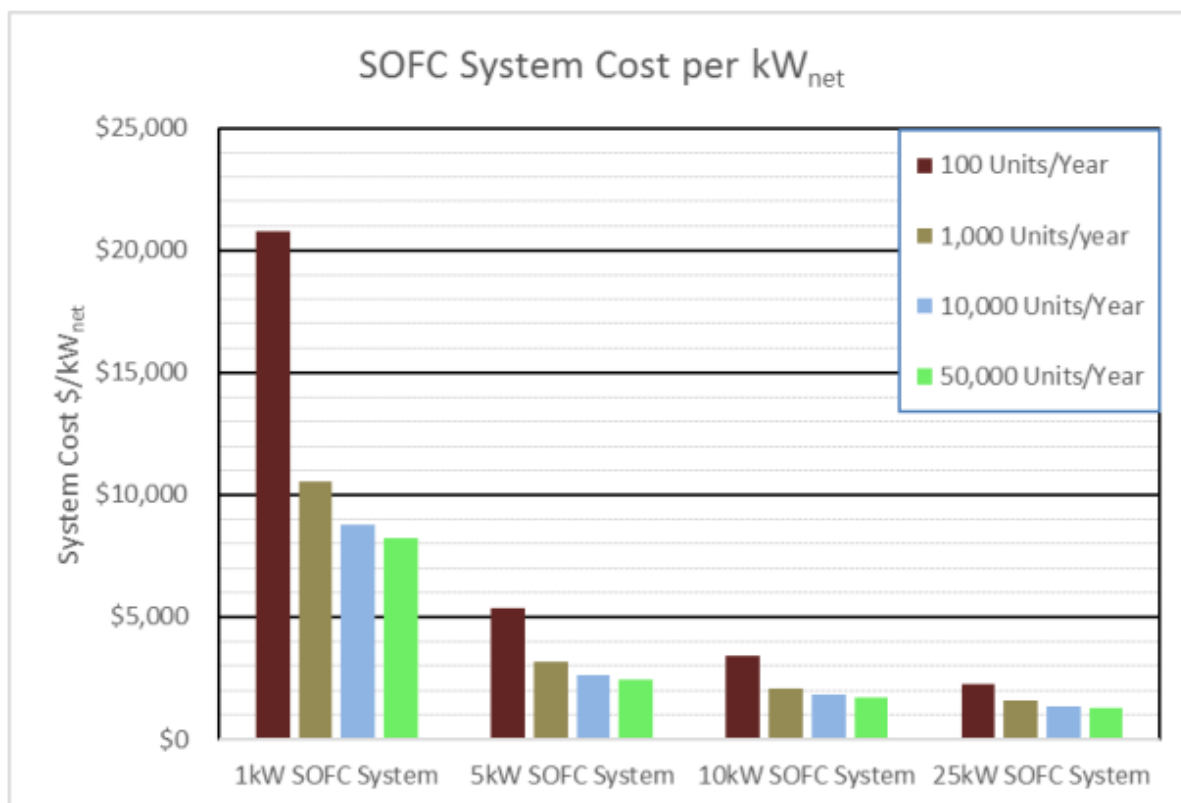
شکل ۵-۲۰ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۱۰۰ کیلووات [۴۶]

Description	100 Units/Yr	1,000 Units/Yr	10,000 Units/Yr	50,000 Units/Yr
Total Stack Manufacturing	\$87,497	\$70,430	\$66,665	\$66,327
Fuel and Air Supply Components	\$18,298	\$15,700	\$14,309	\$13,556
Fuel Processor Components	\$14,347	\$9,797	\$8,604	\$8,253
Heat Recovery Components	\$33,857	\$31,718	\$29,718	\$28,470
Power Electronic, Control, and Instrumentation Components	\$117,962	\$95,050	\$75,453	\$62,217
Assembly Components and Additional Work Estimate	\$19,110	\$17,410	\$15,710	\$14,180
Total system cost, pre-markup	\$291,072	\$240,105	\$210,458	\$193,004
System cost per kW _{net} , pre-markup	\$1,164	\$960	\$842	\$772
Sales markup	50%	50%	50%	50%
Total system cost, with markup	\$436,608	\$360,157	\$315,686	\$289,505
System cost per kW _{net} , with markup	\$1,746	\$1,441	\$1,263	\$1,158



شکل ۵-۲۱ خلاصه هزینه‌های سیستم SOFC CHP و هزینه سیستم SOFC ۲۵۰ کیلووات [46]

شکل ۵-۲۲ هزینه هر کیلووات را برای هر یک از اندازه‌ها و حجم تولید نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، افزایش تولید و حجم سیستم سبب کاهش هزینه‌ها در هر کیلووات می‌شود. با توجه به یک عمر ۵ ساله برای سیستم و میزان تولید بالاتر، سیستم‌های بزرگتر را جذاب می‌کنند.



شکل ۵-۲۲ هزینه هر کیلووات برای سیستم SOFC [۴۵] [۴۶]

۸-۵) کاهش هزینه‌های آینده

بحث زیر، زمینه‌های دارای پتانسیل برای بهبود محصول یا تولید را مشخص می‌کند. به دلیل تاثیر شدید BOP در هزینه‌های کلی سیستم، سخت افزار BOP به وضوح موضوع مورد علاقه برای کاهش هزینه می‌باشد. قبل از بررسی موارد خاص کاهش هزینه، لازم است توجه داشته باشید که نه سیستم PEM و نه SOFC که در اینجا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند از لحاظ هزینه‌ها بصورت کامل بهینه سازی نشده‌اند. هیچ طرحی به طور خاص نشان دهنده تجهیزات نصب شده نیست و بنابراین مستعد بهبود می‌باشد. علاوه بر این، برنامه‌های کاربردی یا تاسیسات خاص محدودیت‌های مختلفی را اعمال می‌کنند و فرصت‌های مختلفی در طراحی سیستم ایجاد می‌کنند. یک فرصت قابل توجه برای کاهش هزینه‌ها احتمالی در اصلاح طرح‌های سیستم برای حذف اجزاء با ادغام با برخی سخت افزارها و یا پیشرفت‌های تکنولوژی که نیاز به برخی از سخت افزار را از بین می‌برند وجود دارد.

اولویت برای بهبود هزینه‌ها در جزئیات پیکربندی سیستم از جمله توجه به پتانسیل ساده‌سازی و ادغام عملکرد می‌باشد. به عنوان مثال، یک تکنولوژی غشای تصفیه و خالص‌سازی هیدروژن کم هزینه می‌تواند به طور بالقوه راکتور ProX، دمنده و مبدل حرارتی مرتبط و سخت افزار کنترل را حذف کند.

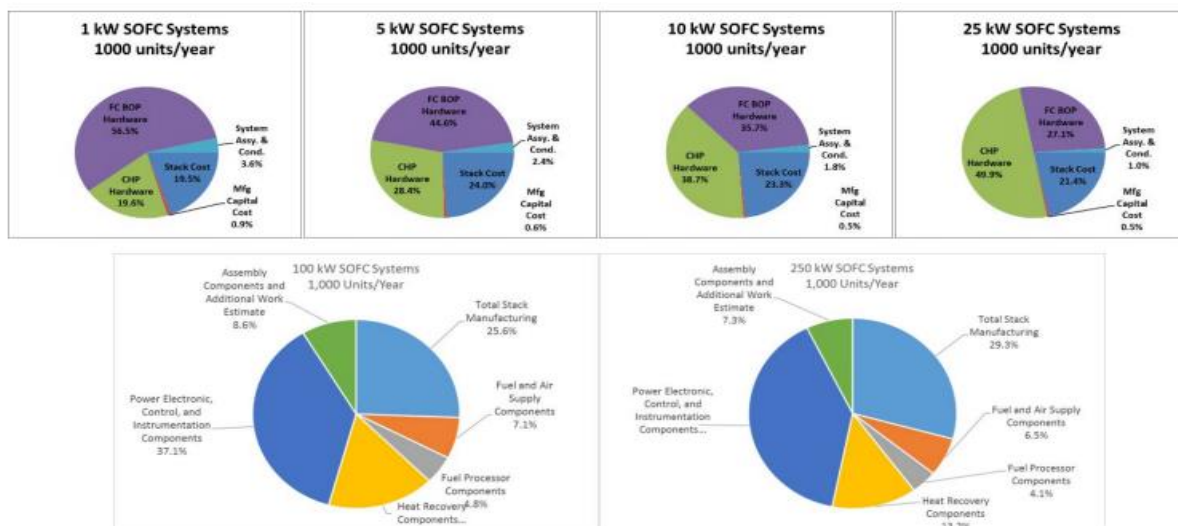
۹-۵) نتیجه‌گیری‌ها

این بخش انرژی اولیه و هزینه‌های پیل سوختی CHP و نتایج حاصل را خلاصه می‌کند.

۱-۹-۵) خلاصه هزینه‌ی سیستم

نمودار خلاصه‌ای برای ۱۰۰۰ واحد در سال (شکل ۱۵-۵) تأکید می‌کند که هزینه‌های BOP از هزینه‌های نهایی سیستم‌های PEM و SOFC بیشتر است. استک حداکثر ۲۷٪ کل هزینه سیستم را شامل می‌شود. در هزینه‌های BOP، عمده‌ترین قسمت‌های تشکیل دهنده‌ی هزینه power electronics (در سخت افزار CHP) و سیستم پردازش سوخت (در FC BOP) هستند.

هزینه‌های کل برای هر اندازه و دو حجم تولید در جدول ۹ و شکل ۲۳-۵ و ۲۴-۵ (سیستم SOFC) نشان داده شده است.



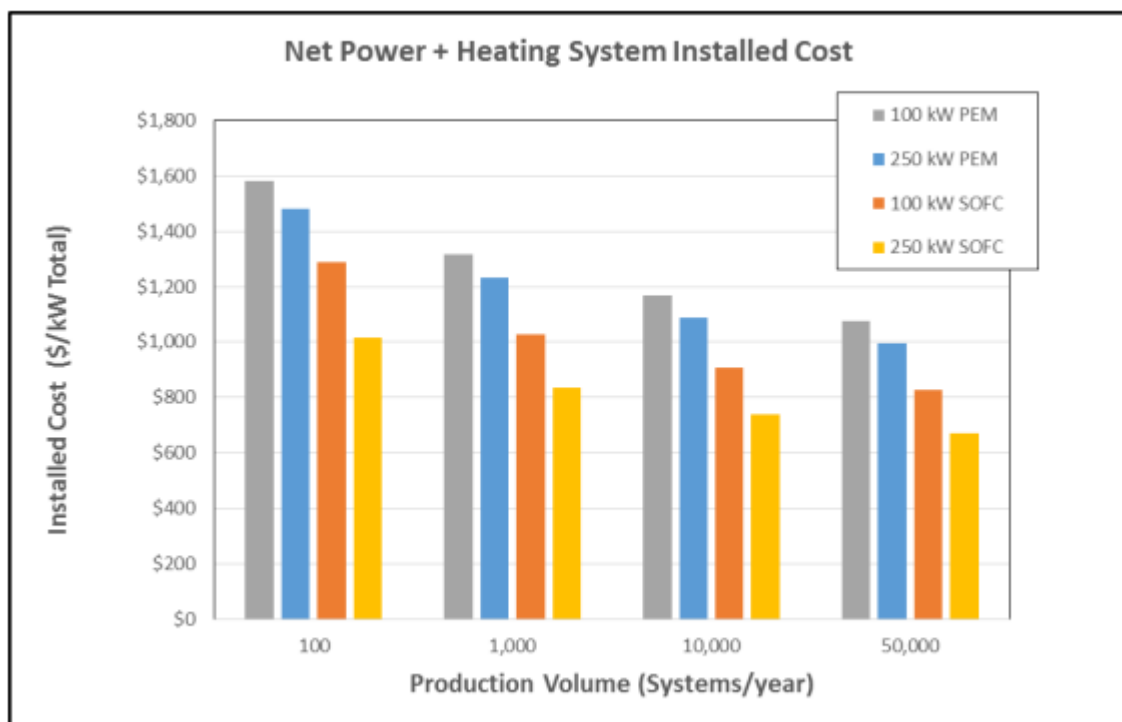
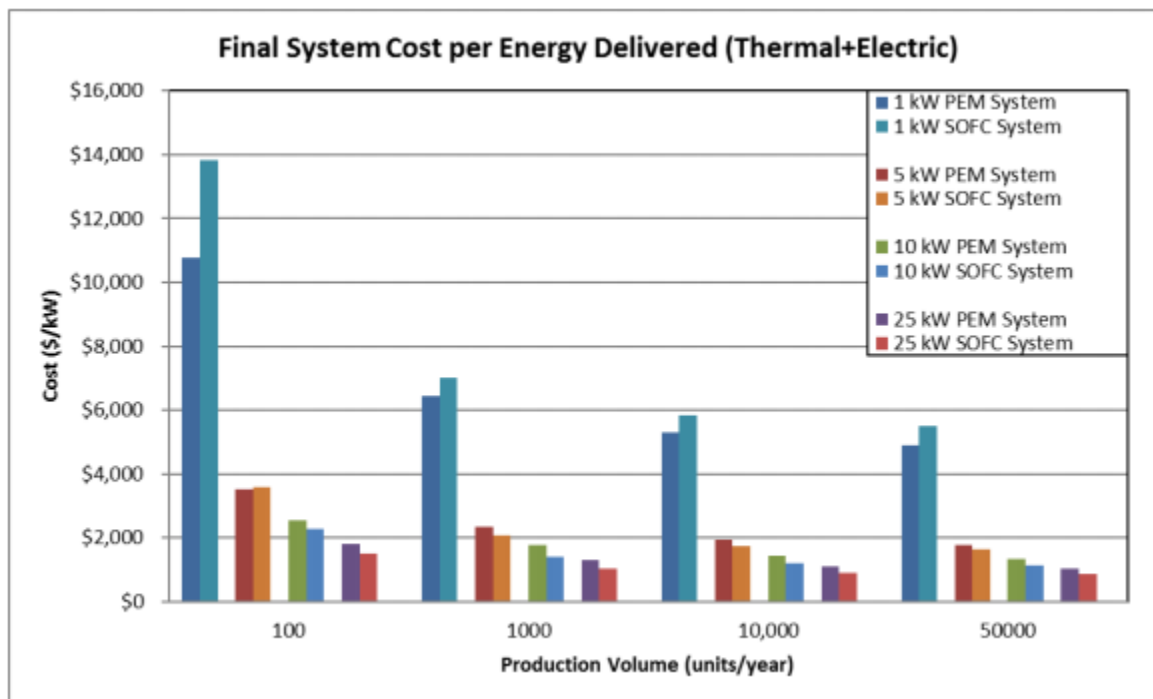
شکل ۵-۲۳ هزینه سیستم SOFC [۴۵] [۴۶]

همانطور که در بخش ۴ این گزارش بیان شده است، سیستم PEM فرض شده است که بهره وری الکتریکی ۳۰٪ و بازده کل (با بازیابی گرما) ۸۰٪ دارا می‌باشد؛ همچنین سیستم SOFC دارای کارایی الکتریکی ۴۰٪ و بازده کل ۹۰٪ است.

SOFC Systems	1 kW		5 kW		10 kW		25 kW	
Description	1,000/yr	10,000/yr	1,000/yr	10,000/yr	1,000/yr	10,000/yr	1,000/yr	10,000/yr
Total stack manufacturing cost, with scrap	\$2,048	\$1,360	\$3,762	\$2,514	\$4,879	\$3,429	\$8,358	\$6,555
Stack manufacturing capital cost	\$90	\$37	\$99	\$65	\$99	\$77	\$209	\$135
CHP Hardware	\$2,069	\$1,895	\$4,456	\$4,054	\$8,117	\$7,452	\$19,433	\$17,939
FC BOP Hardware	\$5,944	\$5,166	\$6,995	\$6,067	\$7,482	\$6,753	\$10,581	\$9,073
System assembly, test, and conditioning	\$378	\$310	\$381	\$313	\$386	\$317	\$399	\$330
Total system cost, pre-markup	\$10,528	\$8,768	\$15,693	\$13,013	\$20,963	\$18,029	\$38,980	\$34,032
System cost per kW _{net} , pre-markup	\$10,528	\$8,768	\$3,139	\$2,603	\$2,096	\$1,803	\$1,559	\$1,361
Sales markup	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Total system cost, with markup	\$15,791	\$13,153	\$23,540	\$19,519	\$31,444	\$27,043	\$58,470	\$51,048
System cost per kW _{net} , with markup	\$15,791	\$13,153	\$4,708	\$3,904	\$3,144	\$2,704	\$2,339	\$2,042

Description	100 kW 1,000 Units/Yr	100 kW 10,000 Units/Yr	250 kW 1,000 Units/Yr	250 kW 10,000 Units/Yr
Total Stack Manufacturing, Testing & Conditioning Costs	\$44,555	\$30,081	\$27,017	\$26,746
Fuel and Air Supply Components	\$10,108	\$8,306	\$7,465	\$6,956
Fuel Processor Components	\$8,245	\$5,693	\$5,247	\$4,962
Heat Recovery Components	\$21,057	\$19,698	\$18,430	\$17,621
Power Electronic, Control, and Instrumentation Components	\$52,988	\$43,627	\$35,622	\$30,213
Assembly Components and Additional Work Estimate	\$11,105	\$10,080	\$9,055	\$8,175
Total system cost, pre-markup	\$148,058	\$117,486	\$102,835	\$94,673
System cost per kW _{net} , pre-markup	\$1,481	\$1,175	\$1,028	\$947
Sales markup	50%	50%	50%	50%
Total system cost, with markup	\$222,087	\$176,229	\$154,252	\$142,009
System cost per kW _{net} , with markup	\$2,221	\$1,762	\$1,543	\$1,420

جدول ۹ هزینه‌های ساخت سیستم SOFC [۴۵] [۴۶]



شکل ۵-۲۴ مجموع هزینه‌های نصب سیستم گرمایش و قدرت بر اساس حجم تولید [45] [46]

۲-۹-۵) پیشنهاد ارزش^۱

در مناطقی که گاز طبیعی ارزان قیمت و برق گران است، نصب یک سیستم پیل سوختی و یا سیستم CHP را جذاب می‌کند. جدول ۱۰ نشان می‌دهد که نرخ بازگشت برای انواع پیکربندی سیستم‌های پیل سوختی امکان‌پذیر است. در حال حاضر محصولات تولید شده و در دسترس برای بازارهای اولیه و CHP برای توان‌های ۲۵ کیلو وات و کمتر موجود نیست و تنها به بررسی سیستم‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلو وات بسنده شده است.

Internal Rate of Return for Commercial Installations in California					
Fuel Cell System Configuration		100 Units/Yr	1,000 Units/Yr	10,000 Units/Yr	50,000 Units/Yr
PEM (without waste heat recovery)	100 kW	-10%	-2%	4%	7%
	250 kW	1%	10%	17%	22%
PEM (with waste heat recovery for heating)	100 kW	5%	16%	23%	27%
	250 kW	12%	23%	31%	36%
SOFC (without waste heat recovery)	100 kW	15%	26%	33%	38%
	250 kW	26%	38%	45%	52%
SOFC (with waste heat recovery for heating)	100 kW	28%	42%	50%	56%
	250 kW	38%	51%	60%	67%

جدول ۱۰ نرخ بازگشت بر اساس نرخ‌های تجاری معمولی در کالیفرنیا [46]

¹ Value Proposition

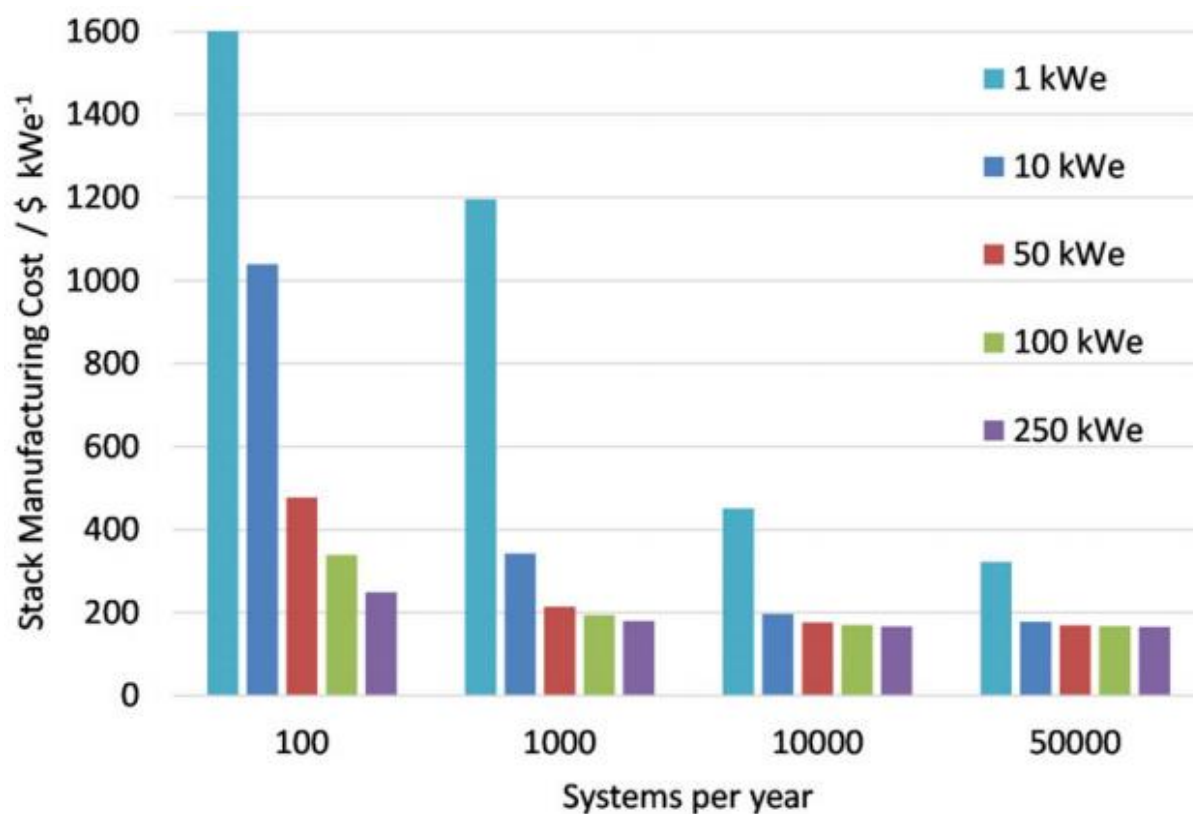
۱۰-۵) مدل هزینه ساخت SOFC توسط مایاس و همکاران

جدول ۱۱ نتایج مدل هزینه برای تمام اندازه های سیستم و میزان تولید را نشان می دهد. انتخاب یک ماده گران تر مانند Crofer 22 APU به جای SS441 هزینه ساخت استک را ۱ تا ۱۴ درصد افزایش می دهد. در این مقاله پیل سوختی اکسید جامد با تکیه گاه آندی مورد بررسی قرار گرفته است. آن ها نیز نشان داده اند که با افزایش سائز سیستم و نرخ تولیدات سالیانه، هزینه های تولید استک کاهش پیدا می کند (شکل ۲۵-۵ و ۲۶-۵). در مقایسه با دو نوع مقایسه تغییرات هزینه به نظر می رسد تا اندازه ای نسبت به میزان تولید نسبت به مقدار تولید حساس تر است و تاثیر حجم سیستم در حجم تولید بالاتر کاهش می یابد.

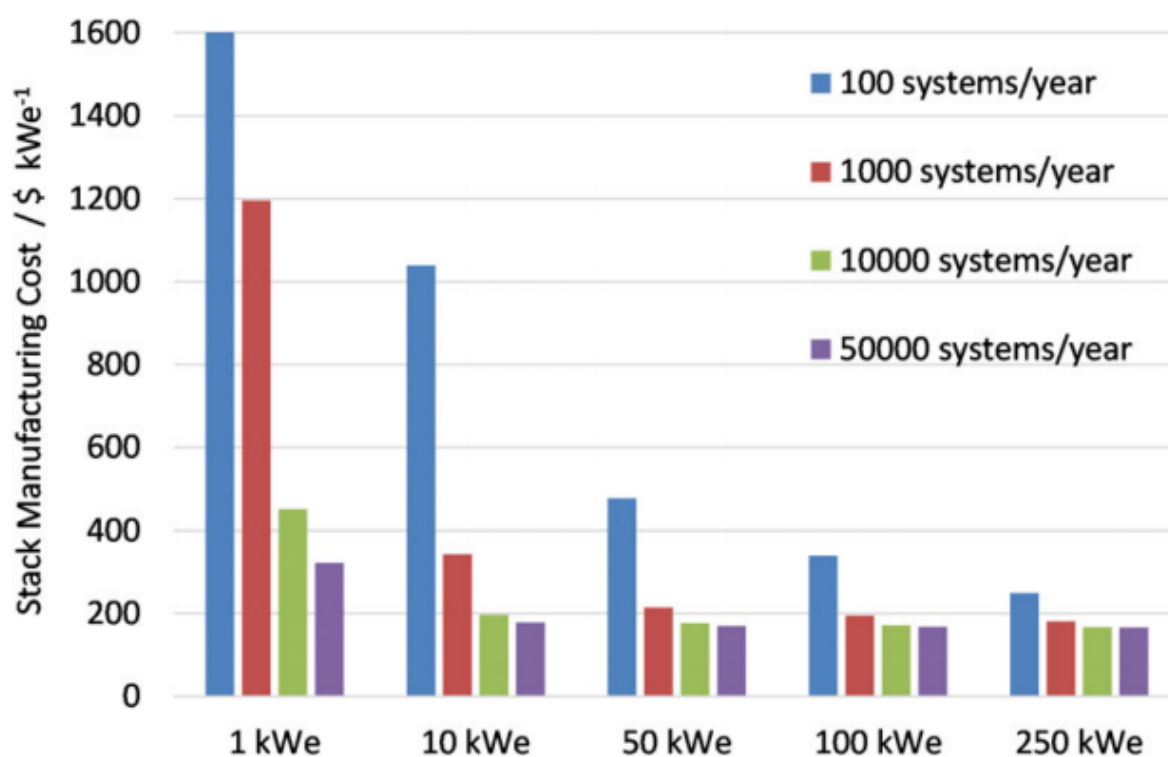
در نرخ تولید توان یکسان، هزینه های استک با افزایش حجم سیستم SOFC، کاهش می یابد (شکل ۲۷-۵). این کاهش هزینه فقط مربوط به مونتاژ استک و هزینه تهویه مطبوع است. مونتاژ و تست استک های توان بیشتر با تعداد کمتر در مقایسه با استک های کم توان با تعداد بیشتر، مقرون به صرفه تر است.

System power / kWe	Systems year ⁻¹	Stack cost Base design / \$ kWe ⁻¹	Stack cost Alternative design / \$ kWe ⁻¹	Cost increase / %
1	100	5,387	5,463	1.4%
1	1,000	1,196	1,252	4.7%
1	10,000	451	485	7.4%
1	50,000	322	347	7.7%
10	100	1,039	1,096	5.4%
10	1,000	342	376	9.7%
10	10,000	197	221	12.3%
10	50,000	178	202	13.1%
50	100	478	514	7.7%
50	1,000	215	240	11.5%
50	10,000	176	200	13.2%
50	50,000	170	193	13.5%
100	100	339	372	9.8%
100	1,000	194	219	12.4%
100	10,000	171	194	13.5%
100	50,000	168	191	13.7%
250	100	249	274	10.0%
250	1,000	181	204	13.0%
250	10,000	167	190	13.7%
250	50,000	166	189	13.9%

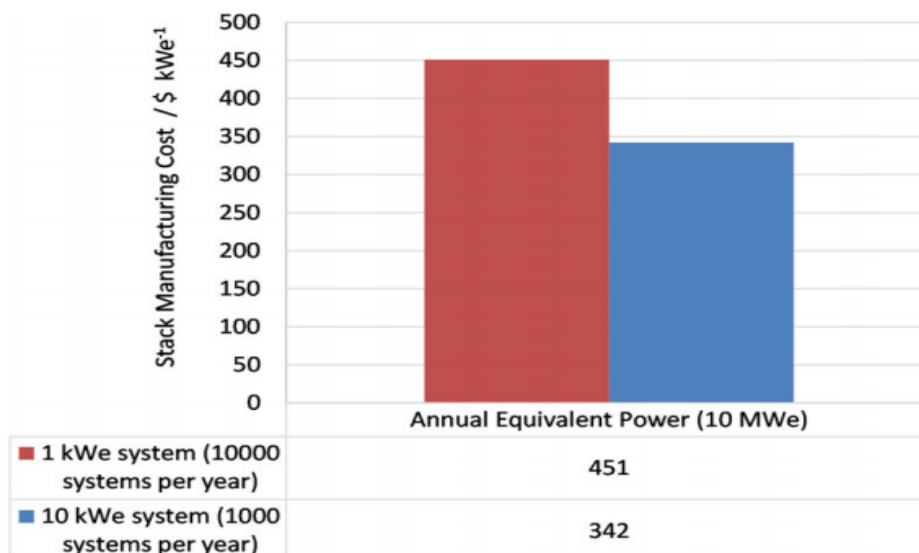
جدول ۱۱ هزینه ساخت برای استک SOFC [47]



شکل ۵-۲۵ تغییرات هزینه ساخت استک با سایز سیستم [47]

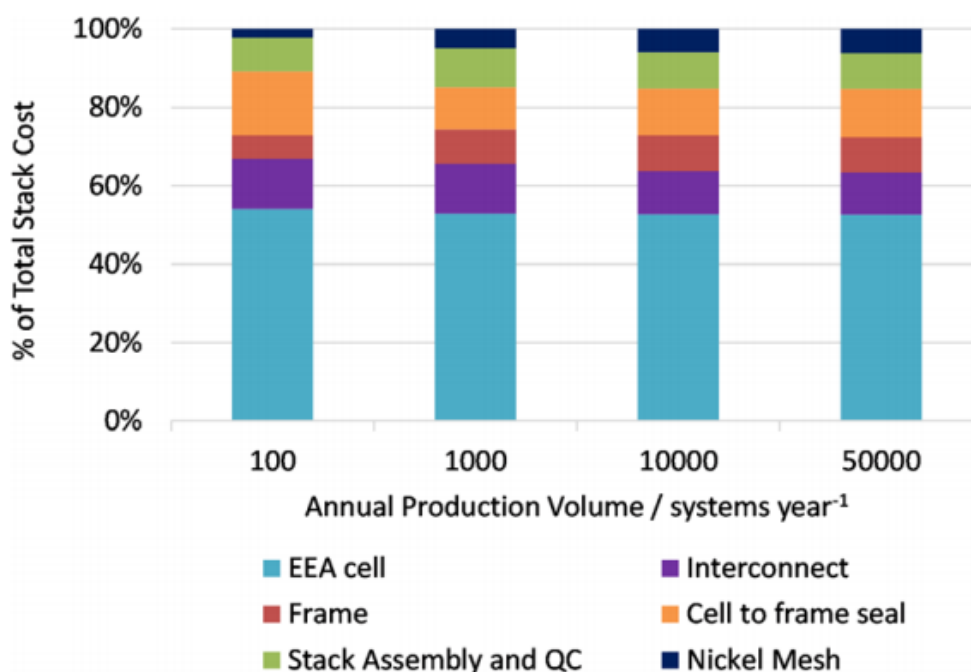


شکل ۵-۲۶ تغییرات هزینه ساخت استک با نرخ تولیدات سالیانه [47]



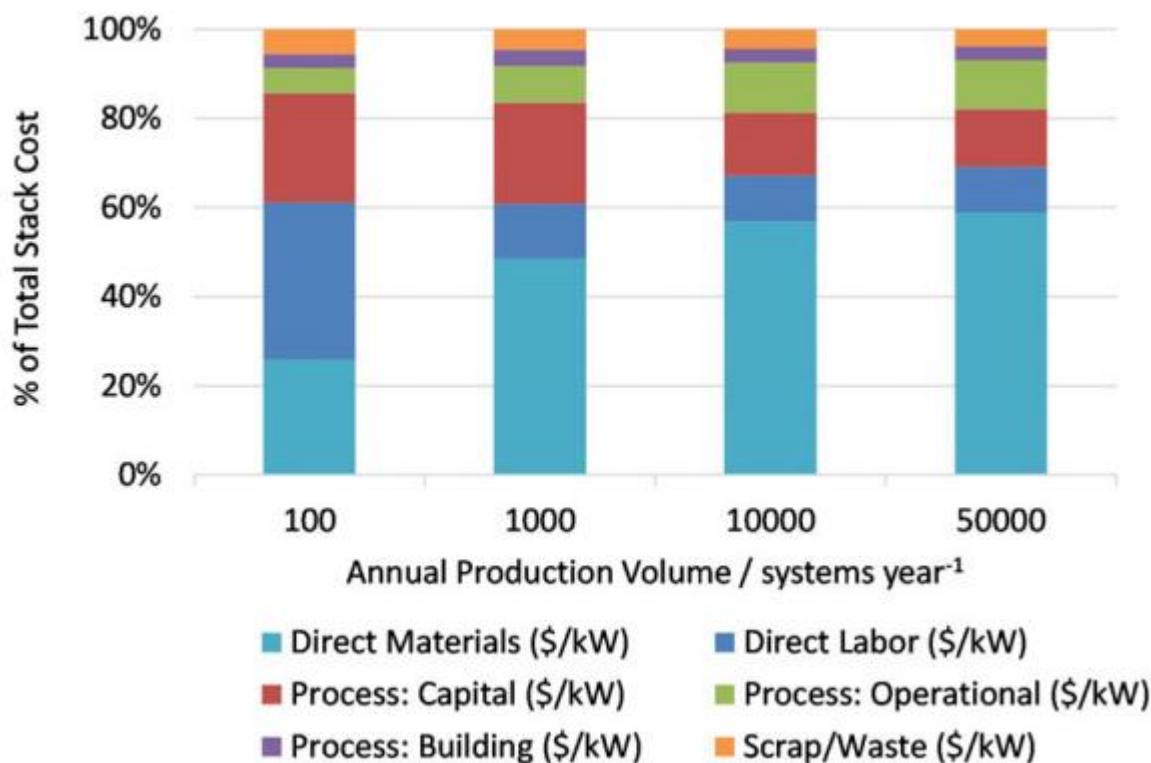
شکل ۵-۲۷ هزینه‌های ساخت استک [47]

شکل ۵-۲۸ در زیر هزینه‌های ساخت استک را که توسط جزء برای سیستم‌های ۱۰ کیلو وات ساخته شده است، نشان می‌دهد. بزرگترین بخش در هزینه ساخت استک، EEA است که حدود ۵۰ درصد کل هزینه را در تمام موارد مورد بررسی، شامل می‌شود. اتصال‌دهنده و سلول به قاب مهر و موم هر تشکیل دهنده ۱۱-۱۵٪ از هزینه استک را شامل شده و با افزایش حجم تولید، کاهش پیدا می‌کنند. فرآیند مونتاژ و تهویه استک در حدود ۹٪ هزینه استک ثابت می‌باشد. سهم نسبی هزینه تولید فریم در هزینه کلی استک با حجم تولید افزایش می‌یابد.



شکل ۵-۲۸ هزینه استک با درصد نسبی هزینه اجزای استک به هزینه کلی استک برای سیستم‌های ۵۰ کیلو وات [47]

شکل ۲۹-۵ نشان می‌دهد که با افزایش حجم فرایند تولید، هزینه‌های عملیاتی افزایش می‌یابد و هزینه کار در سطح بالایی از اتوماسیون کاهش می‌یابد. هزینه‌های سرمایه و ساخت و ساز به دلیل استفاده از تجهیزات بالاتر کاهش می‌یابد و هزینه‌های ضایعات کاهش می‌یابد از آنجا که مدل هزینه فرض می‌کند که نرخ معیوب در حجم تولید بالاتر، پایین است.



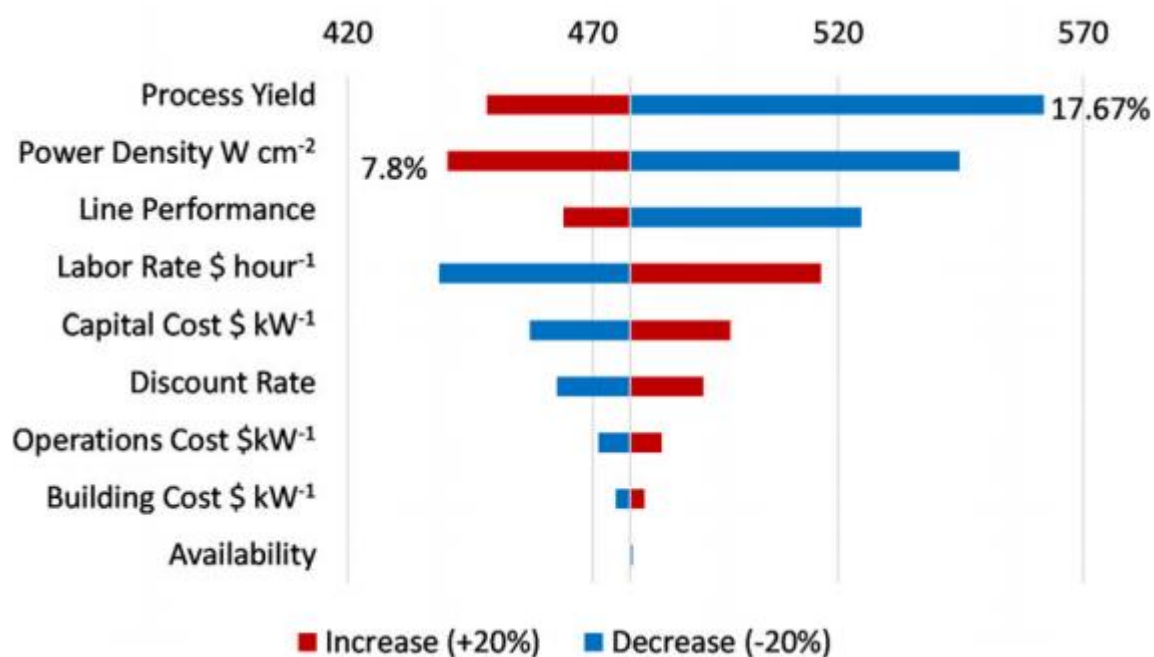
شکل ۲۹-۵ هزینه استک با درصد نسبی اجزای هزینه به کل هزینه استک برای سیستم ۵۰ kWe [47]

شکل ۳۰-۵ و ۳۱-۵ نتایج مربوط به حجم تولید ۱۰۰ و ۵۰ هزار سیستم در سال را نشان می‌دهد. چگالی توان^۱ و عملکرد فرایند^۲ پارامترهایی هستند که بیشترین تاثیر را در هزینه ساخت استک دارند. علاوه بر این، حساسیت این پارامترها با حجم تولید سالانه افزایش می‌یابد. عملکرد خط نیز به شدت بر هزینه ساخت استک تاثیر می‌گذارد، زیرا تلفات سرعت دستگاه موجب افزایش ساعت کاری سالانه و در نتیجه هزینه‌های کار و عملیات می‌شود.

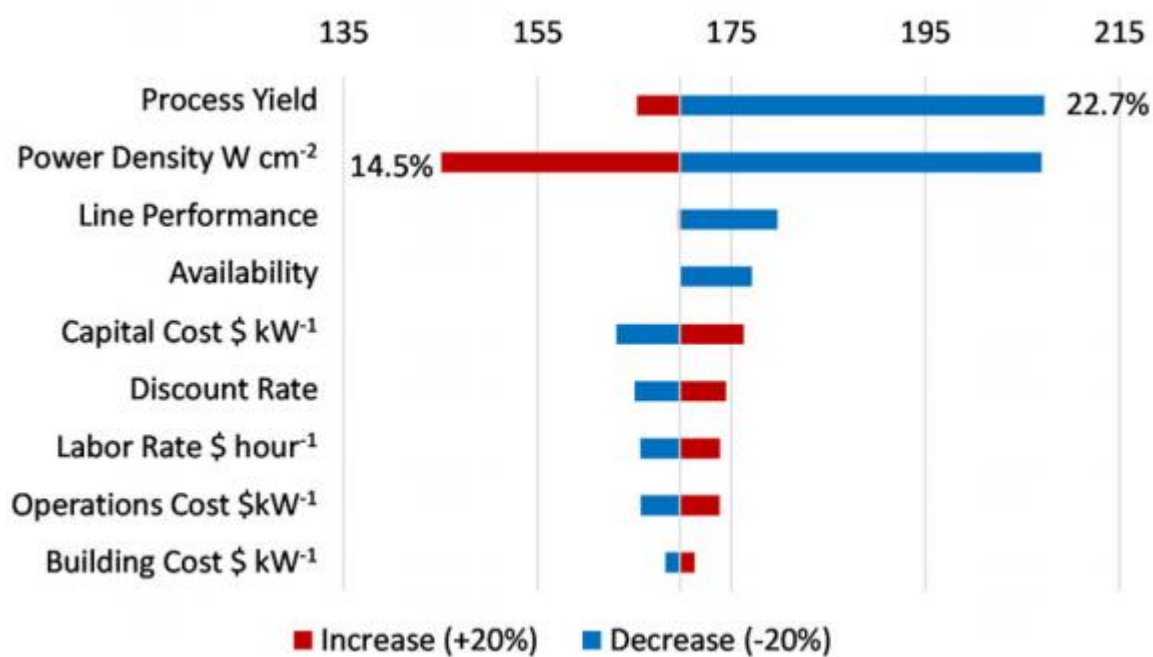
در دسترس بودن تاثیر ناچیزی را در حجم کم ۱۰۰ سیستم در سال دارد، زیرا در این صورت تغییر آن تنها باعث افزایش میزان استفاده از خط تولید می‌شود، اما نه افزایش ماشین آلات مورد نیاز برای تضمین تولید سالانه مورد نیاز. میزان کار با توجه به سطح بالاتری از اتوماسیون و حجم تولید بالاتر، اهمیت کمتری دارد. هزینه‌های عملیاتی و ساختمانی عوامل موثر بر هزینه تولید استک در همه موارد هستند.

¹ Power density

² process yield



شکل ۵-۳۰ آنالیز حساسیت برای سیستم‌های ۵۰ کیلووات با حجم تولید ۱۰۰ سیستم در سال [47]



شکل ۵-۳۱ آنالیز حساسیت برای سیستم‌های ۵۰ کیلووات با حجم تولید ۵۰۰۰۰ سیستم در سال [47]

۱-۱۰-۵) نتیجه‌گیری

بر اساس فرض‌های در نظر گرفته در اینجا، هزینه‌های تولید ۱۷-۲۰٪ از هزینه‌های برآورد شده صنعت است. نتایج نشان داده است که EEA حدود ۵۰ درصد از هزینه استک در تمام حجم تولید سالانه را تشکیل می‌دهد، و پس از آن، روند آب‌بندی سلول‌ها در ۱۰-۱۸ درصد و اتصالات ۱۰ تا ۱۸ درصد هزینه تولید استک می‌باشد.

۶) فصل

شناسایی نقاط گلوگاهی فنی و
اقتصادی فعلی و روش‌های حل آن

۶-۱) مقدمه

پیل سوختی اکسید جامد به دلیل بازدهی بالای آن و تنوع در سوخت، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. با این حال در این پیل چالش‌هایی مانع از روند سریع تجاری‌سازی شده است که نیاز به حل آن‌ها است. مهم‌ترین این چالش‌ها شامل موارد زیر می‌باشد:

- ۱) ناشناخته بودن فناوری پیل‌های سوختی در جهان
- ۲) گران بودن: از آنجایی که هنوز خطوط تولید پیل‌های سوختی وجود ندارد، تولید پراکنده آن‌ها بسیار گران است. علاوه بر این، در ساخت این وسایل از برخی مواد گران‌قیمت (مانند کاتالیزورها) نیز استفاده می‌شود.
- ۳) طول عمر: طول عمر کم در مقایسه با سایر تکنولوژی (ممکن است در مدت طولانی کار، گرما موجب مشکلاتی چون ناسازگاری عناصر و افت انرژی شود).
- ۴) در صورت استفاده از سوخت ناخالص، کار و گرمای بیش از حد موجب رسوب کربن و در نهایت مسمومیت پیل می‌گردد.
- ۵) آب‌بندی: ضریب انبساط حرارتی مواد مختلف که پیکره پیل را تشکیل می‌دهند، با هم همخوانی نداشته و امکان آب‌بندی را بخصوص در شکل صفحه‌ای پیل سوختی اکسید جامد مشکل می‌نماید.

۶-۲) طول عمر

عمر محدود استک پیل سوختی اکسید جامد به دلیل دمای کاری بالای لازم (فعالیت کاتالیستی واکنش کاهش اکسیژن در کاتد و هدایت یونی در الکترولیت) از محدودیت‌های این نوع پیل است.

۶-۲-۱) حل ناپایداری مواد

ناپایداری مواد (خوردگی و تخریب، تفکیک و شکست) نتیجه مستقیم این دمای بالاست. پیل‌های اکسید جامد دمای پایین و دما متوسط با اتصال مناسب الکترولیت و کاتد برای غلبه بر چالش دمای بالای پیل اکسید جامد توسعه داده شده و امکان استفاده از محدوده وسیع‌تری از مواد مناسب برای پیل را فراهم کرده اند اما همچنان فعالیت کاتالیستی و ریفرمینگ مستقیم سوخت‌های هیدروکربنی در آن‌ها با مشکلاتی روبروست.

۶-۲-۲) استفاده از میدان الکتریکی

به تازگی محققان دانشگاه واشنگتون^۱ موفق به معرفی یک گام مهم در بهبود بازده پیل‌های سوختی اکسید جامد به عنوان یک فناوری انرژی پاک شده‌اند تا شاید بتوانند راهی برای پذیرش عمومی و گسترش آن در بازار بیابند. این کلید، در حقیقت راه حلی برای رفع اولین نقطه شکست برای کارکرد طولانی پیل‌های سوختی

^۱ Washington State

است. پیل سوختی یک وسیله الکتروشیمیایی است که می تواند به طور مستقیم انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند. هرچند تشابهاتی با باتری دارند [48].

اما مهم ترین تفاوت آنها در مصرف نشدن الکترولیت است. در یک پیل سوختی از سوخت های مختلف برای ایجاد الکتریسیته استفاده می شود. پیل های سوختی می توانند تا چهار برابر موتورهای احتراقی بازده داشته باشند بدون اینکه کوچکترین آلودگی را وارد محیط زیست کنند. در پیل سوختی اکسید جامد، الکترون های ایجاد شده از طریق یک مدار خارجی از داخل الکترولیتی که رسانای الکترون نیست عبور می کنند و منجر به تولید برق می شوند [48].

یکی از مزایای این پیل ها، سازگاری آنها با بیشتر سوخت های طبیعی و عدم نیازشان به الکترودهای گران قیمت طلا و پلاتین است. مشکل اصلی این پیل های سوختی در توقف روند واکنش بعد از گذشت مدت مشخصی از زمان است که موجب از کار افتادن پیل می شود. این پدیده در منطقه ای به نام TPB، یا منطقه مرز مشترک سه فاز بین آنند با سوخت و الکترولیت رخ می دهد. از این رو با اعمال یک میدان الکتریکی در این مرز می توان از توقف واکنش الکترولیز آب جلوگیری کرد [48].

در حقیقت این راه حل موجب محدود شدن استفاده از مواد گران قیمت به عنوان کاربرد در الکترولیت، آند و کاتد می شود چرا که یکی از دلایل عدم کارکرد بهینه پیل های سوختی را در مناسب نبودن جنس آند، کاتد، الکترولیت و حتی اتصال دهنده ها می دانستند. حال آن که ایجاد یک میدان برای حرکت دائمی الکترون ها و عدم توقف واکنش شیمیایی ساده ترین راه برای بهبود بازده این تجهیزات پاک برای تولید انرژی هستند. لازم به ذکر است که این تحقیق بر روی پیل های سوختی اکسید جامد با الکترولیت هایی از جنس نیکل / زیرکونیای پایدار شده با ایتیریم صورت گرفت [48].

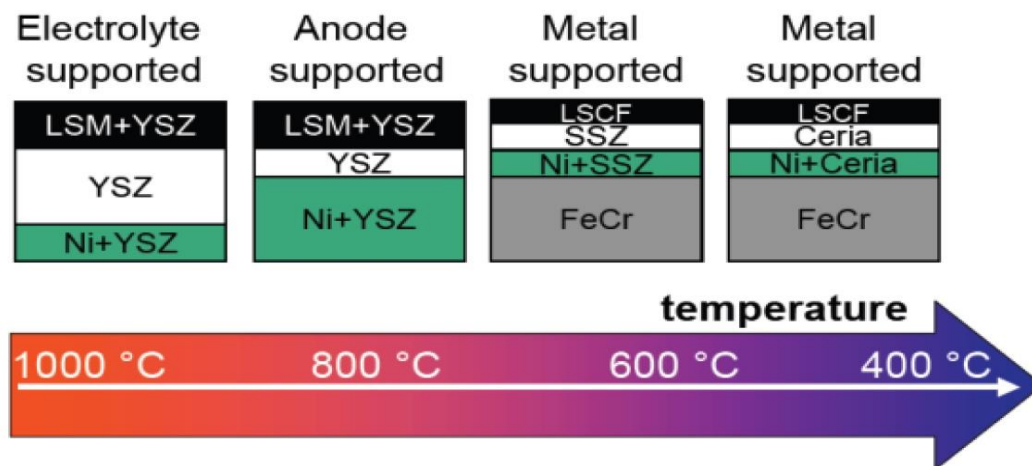
۳-۲-۶) نوع تکیه گاه پیل سوختی

یکی از پارامترهای تعیین کننده دمای عملکرد پیل سوختی، انتخاب نوع پایه (فصل ۳) است. شکل (۱-۶) اثر نوع پایه را بر دمای عملکردی پیل نشان می دهد. دمای عملکردی پایین تر پیل، امکان استفاده از مواد ارزان تر را برای صفحات اتصال دهنده فراهم می نماید. همچنین مزایایی از قبیل مدیریت گرمایی ساده تر، راه اندازی و خاموش شدن سریعتر را به همراه دارد. با این حال، با کاهش دما، فعالیت کاتالیستی الکترودها و رسانایی یونی الکترولیت بشدت کاهش می یابد. برای رفع این مشکل از دو راه حل :

الف) استفاده از مواد با رسانایی بهتر در دمای پایین

ب) کاهش ضخامت الکترولیت و استفاده از لایه های نازک

استفاده می شود.



شکل ۶-۱ تاثیر انتخاب نوع پایه بر روی دمای عملکردی پیل [20]

۴-۲-۶) پیل سوختی اکسید جامد هادی پروتون میکرو صفحه‌ای

در حال حاضر تحقیقاتی بر روی نسل جدید پیل‌های سوختی اکسید جامد برای کاهش دما و افزایش طول عمر انجام شده است. نسل جدید پیل‌های سوختی اکسید جامد دما متوسط و دماپایین، پیل‌های هادی پروتون هستند. الکترولیت پیل هادی پروتون از جنس موادی است که قابلیت هدایت یون مثبت هیدروژن (پروتون) در آن غالب است. پیل هادی پروتون نسبت به پیل هادی یون اکسیژن (پیل اکسید جامد معمولی) فعالیت کاتالیستی مناسب‌تری دارد [49]. تفاوت اصلی پیل سوختی اکسید جامد هادی پروتون با پیل اکسید جامد معمولی در الکترولیت آن است. الکترولیت یکی از اجزای مهم پیل سوختی اکسید جامد است که ممکن است از سرامیک هادی یون اکسیژن نظیر ایتريای پایدار شده با زیرکونیا^۱ و یا از مواد هادی پروتون مانند BaCeO₃ دوپ شده^۲ با گادولینیوم^۳ یا ساماریوم^۴ باشد [۷].

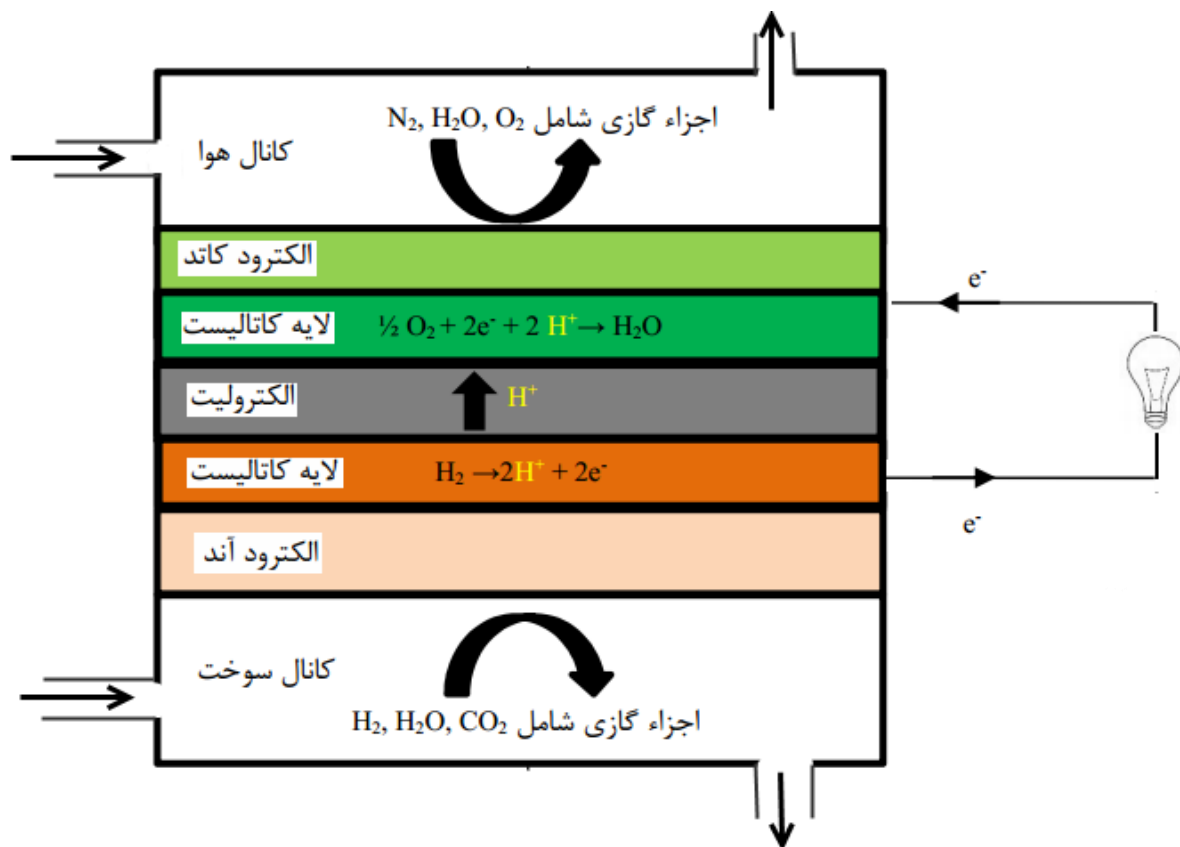
در پیل سوختی اکسید جامد هادی پروتون، سوخت هیدروژن در مرز الکترولیت و آند اکسید شده و سبب تولید الکترون و پروتون می‌شود. پروتون از طریق الکترولیت هادی یون مثبت، از سمت آند به سمت کاتد منتقل شده و در آن جا با الکترون دریافتی از آند از طریق مدار خارجی و اکسیژن واکنش داده و تولید آب و حرارت می‌کند. شماتیک و واکنش‌های انجام شده در آند و کاتد پیل هادی پروتون و واکنش کلی در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.

^۱ Yttria-stabilized Zirconia

^۲ Doped

^۳ Gd

^۴ Sm



شکل ۶-۲ نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد هادی پروتون [50]

دمای متوسط، طول عمر بیشتر، زمان راه اندازی کوتاه تر و قیمت پایین تر مواد سازنده اجزا از ویژگی های پیل سوختی اکسید جامد هادی پروتون می باشد. انرژی فعال سازی لازم برای تحرک یون پروتون در الکترولیت هادی پروتون بسیار کمتر از مقدار معادل برای تحرک یون اکسیژن در الکترولیت هادی این یون است. بدین معنی که امکان عملکرد الکترولیت هادی پروتون در دمای کمتری نسبت به الکترولیت هادی یون اکسیژن وجود دارد. یون هیدروژن نسبت به یون اکسیژن اندازه کوچکتری داشته و طبیعی است که جابجایی یون هیدروژن با ابعاد بسیار کوچکتر از یون هیدروژن به انرژی کمتری نیاز داشته باشد [50]. این نوع پیل سوختی اکسید جامد در حال حاضر در مرحله تحقیقات آزمایشگاهی و مدل سازی است.

۳-۶) آب بندی

آب بندی بخصوص در پیل سوختی اکسید جامد صفحه ای به منظور جلوگیری از اختلاط سوخت و اکسیژن در مکان های ناخواسته به کار می رود. انتخاب آب بندی باید از نظر ساختار، خواص ترمو فیزیکی و کاربردی تحت شرایط عملیاتی پیل سوختی انجام گیرد. آب بندی به طور کلی به معنای مجزا کردن سیستم از محیط اطراف است. در پیل سوختی از آنجا که برای تولید الکتریسیته باید اختلاط سوخت و اکسیژن در محل خاصی صورت پذیرد باید از اختلاط ناخواسته ی آن ها در سایر مکان ها جلوگیری گردد. چالش آب بندی کردن سوخت و اکسیژن در استک صفحه ای SOFC از اهمیت خاصی برخوردار است. استفاده از آب بندی به طراحی بستگی

کامل دارد چنانچه در طراحی لوله‌ای و مونولیتیک نیازی به آب‌بندی نیست درحالی که در طراحی صفحه‌ای به آب‌بندی چندگانه نیاز است. آب‌بندی در استک دما بالا برای جدایش سوخت و گاز اکسیدان در اجزای مجاور مورد نیاز است. فایده‌ی دیگر آب‌بندی جلوگیری از اکسیداسیون اتصال‌دهنده‌های فلزی در دماهای نسبتاً بالای کارکرد پیل سوختی است. آسیب دیدن آب‌بندی می‌تواند به افزایش اضافه پتانسیل و ایجاد حرارت موضعی در سیستم منجر شود.

آب‌بندی‌ها به دو دسته‌ی فشاری و صلب طبقه‌بندی می‌شوند. آب‌بندی‌های فشاری عموماً بر پایه‌ی مواد گروه میکا و کامپوزیت آن‌ها می‌باشند. آب‌بندی‌های صلب معمولاً از جنس شیشه، شیشه-سرامیک و فلزات و کامپوزیت آن‌ها هستند. امروزه استفاده از آب‌بندی‌های کامپوزیتی شیشه/سرامیک و فلز/سرامیک به علت نشت بسیار کم از کاربرد روز افزونی برخوردار شده است. در ادامه انواع آب‌بندی‌ها، مزایا، معایب و خواص آن‌ها بررسی شده‌اند.

۱-۳-۶) خواص آب‌بندی

آب‌بندی باید خواص مطلوبی دارا باشد:

- الف) مرطوب کردن اجزای پیل سوختی در دمای آب‌بندی
- ب) سازگاری شیمیایی با اجزای پیل سوختی
- ج) مقاومت در برابر شوک حرارتی و سازگاری ضریب انبساط حرارتی با ضریب انبساط حرارتی فولاد ضد زنگ
- د) دارا بودن خاصیت فنی نسبت به تنش‌های (نیروهای وارد بر سطح) گذرای ناشی از گرم و سرد شدن
- ز) مقاومت حجمی الکتریکی کافی که رسیدن مقاومت ویژه سطحی به ۵۰۰ کیلو اهم بر سانتی متر مربع در ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد را امکان پذیر می‌سازد.

۲-۳-۶) مشکلات آب‌بندی‌ها

دشواری‌های آب‌بندی پیل‌های سوختی اکسید حالت جامد صفحه‌ای :

- ۱) عدم هماهنگی شیمیایی با اجزای پیل که منجر به کاهش عمر پیل می‌گردد.
- ۲) ایجاد باند ناقص با اجزای پیل سوختی که منجر به نشت و مخلوط واکنش‌دهنده و هوا می‌گردد.
- ۳) نداشتن ویسکوزیته (لزجت، سختی حرکت) مناسب در دماهای بالا
- ۴) هدایت الکترونی یا یونی که منجر به نشت جریان می‌گردد.
- ۵) کم بودن مقاومت در برابر انبساط حرارتی که منجر به ایجاد تنش می‌گردد.
- ۶) عدم تطبیق ضریب انبساط حرارتی بین آب‌بندی و سایر اجزا
- ۷) عدم حفظ یک پارچگی آب‌بندی

آببندی نامناسب حتی در شرایط حالت پایدار در ابتدای کارکرد می‌تواند منجر به کاهش عملکرد گردد. از دیگر عواقب آن کاهش پتانسیل ترمودینامیکی یا افزایش اضافه پتانسیل است. به علاوه از بین رفتن آب بندی می‌تواند منجر به ایجاد حرارت موضعی غیرقابل تحمل در اجزای سیستم گردد که نهایتاً به از بین رفتن سیستم و آسیب‌های امنیتی منجر خواهد شد. به دلایل ذکر شده بیشتر نشتی‌های حتی در حد بسیار ریز رخ داده غیر قابل قبول بوده و نشتی‌های دائمی حتی در مقیاس کم در دراز مدت عملکرد سیستم را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند.

۴-۶) انواع آببندی بکار برده شده

آببندی‌های بکار برده شده به صورت کلی عبارتند از: الف) آببندی صلب یا ایجاد کننده پیوند، ب) آببندی فشاری ج) آببندی‌های هیبریدی و د) آببندی فلزی.

در دسته اول که شامل شیشه و شیشه-سرامیک‌ها می‌باشد از چسباندن صلب (جامد) اجزا به هم استفاده می‌شود. خطر تهدید کننده این نوع آببندی‌ها شکنندگی و ایجاد ترک در زیر دمای انتقالی شیشه است. به علاوه از بین رفتن این آببندی‌ها، واکنش‌های فصل مشترکی را تسهیل می‌کند. نفوذ حالت جامد را افزایش خواهد داد که سبب کاهش توان خروجی می‌گردد. آببندی‌های فشاری از اعمال فشار مکانیکی بهره می‌برند. آببندی‌های هیبریدی به عنوان ترکیبی از آببندی‌های صلب و فشاری مطرح‌اند.

معایب عمده در کاربرد آببندی فلزی موارد زیر است: استحکام تسلیم کم و خزش زیاد (شکست سریع فلز)، مقاومت خزشی کم ناشی از آزادسازی تنش در درجه حرارت‌های بالاست. آب بندی در اثر تغییر فرم غیرقابل بازگشت در اثر سرد و گرم شدن ممکن است آسیب ببیند که راه حل آن استفاده از نیروی فشاری خارجی برای اطمینان از فشردن بودن آببندی در کلیه دماهاست.

۵-۶) گران بودن

برای صنعتی شدن پیل‌های سوختی، به عنوان یک انرژی پایدار، مسئله‌ی اقتصادی در تولید این نوع سیستم‌ها باید بهینه‌سازی شود. عموماً در ساخت این پیل‌ها، از فلز گران‌قیمت و کمیاب پلاتین استفاده می‌شود که حدود سی درصد کل هزینه‌های پیل سوختی را به خود اختصاص می‌دهد. پارامترهای متعددی در افزایش قیمت این سیستم‌ها نقش موثری دارند از جمله:

۱-۵-۶) مواد به کار رفته در ساخت پیل

یکی از راهکارهای مهم که در بسیاری از تحقیقات در حال حاضر انجام می‌شود استفاده از مواد ارزان‌تر می‌باشد. همان‌طور که در فصل ۳ اشاره کردیم انتخاب نوع تکیه‌گاه (تکیه‌گاه مکانیکی می‌باشد که دیگر لایه‌های اصلی بر روی آن لایه نشانی می‌شوند) نیز در هزینه نهایی تولید پیل سوختی موثر است. بنابراین این زیرلایه باید

دارای استحکام مکانیکی، پایداری شیمیایی و از لحاظ خواص حرارتی با دیگر لایه‌ها مطابقت داشته باشد. این زیرلایه خود می‌تواند نقش الکترولیت، کاتد، آند، اتصال‌دهنده و فلز متخلخل را داشته باشد. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد تاثیر این تکیه‌گاه در دمای عملکرد پیل سوختی بسیار محسوس بوده و از طرفی با انتخاب فلزات کم هزینه‌تر در نوع اتصال‌دهنده و فلز متخلخل می‌توان هزینه ساخت را کاهش داد. اما مهم‌ترین محدودیت در نوع ساخت، تفاوت‌های ساختاری لایه‌های مختلف (ضخامت، ترکیب مواد، ریز ساختار مناسب و ...) انتخاب یک روش واحد که برای ساخت تمامی لایه‌ها از لحاظ تکنیکی و اقتصادی مناسب باشد مقدور نیست و بهترین حالت شاید ترکیبی از انواع روش‌ها باشد.

۲-۵-۶) تعداد تولید و سائز سیستم پیل سوختی

در تحقیقات مختلف انجام شده (فصل ۵) تعداد تولید در سال و سائز سیستم‌های با توان مختلف نشان دادند، یکی از راهکارهای کاهش هزینه نهایی سیستم افزایش تعداد تولید در سال و سائز سیستم (توان بالاتر) است.

۶-۶) نتیجه گیری

دلایل فوق را می‌توان مهم‌ترین چالش‌ها در ساخت و روند تجاری سازی نام برد که راه‌های گوناگون برای برطرف شدن این چالش‌ها ارائه گردیده است. راه حل کلی برای هر قسمت وجود نداشته ولی می‌توان با انتخاب نوع ساختار یا ماده هم هزینه و هم طول عمر را بهبود بخشید.

ناشناخته بودن فناوری با گذشت زمان و سرمایه‌گذاری‌های بیشتر برطرف خواهد شد. از طرفی از سوخت‌های مناسب استفاده شده و از ناخالصی جلوگیری گردد.

آب‌بندی‌های فشاری عموماً بر پایه مواد گروه میکا و کامپوزیت آن‌ها می‌باشند. آب‌بندی‌های صلب معمولاً از جنس شیشه، شیشه-سرامیک و فلزات و کامپوزیت هستند. امروزه استفاده از آب‌بندی‌های کامپوزیتی، شیشه-سرامیک و فلز-سرامیک به علت نشت بسیار کم از کاربرد روز افزونی برخوردار شده است.

اما سه چالش گرانی، طول عمر، آب‌بندی موضوعات مورد تحقیق و بررسی در سال‌های اخیر می‌باشند.

موانع عمده تجاری‌سازی برای پیل‌های سوختی به صورت خلاصه در جدول ۱-۶ نشان داده شده است.

جدول ۶-۱ موانع عمده تجاری سازی پیل‌های سوختی

✓ سرمایه گذاری اولیه بالا ✓ هزینه بالای جایگزینی استک (سرمایه گذاری مجدد برای مشتری) ✓ در دسترس بودن مدل‌های محدود مالی برای غلبه بر مانع هزینه		موانع اقتصادی
✓ دوام استک و عمر طراحی سیستم ناکافی ✓ عدم استحکام و قابلیت اطمینان کافی از استک ✓ نرخ تخریب بالا و نتیجه تلفات در کارایی		موانع فنی
✓ عدم استحکام ✓ فقدان منابع مالی و انسانی ✓ عدم استاندارد سازی (به عنوان مثال: طراحی جزء)		موانع زنجیره ای تامین سازی
✓ قوانین و مقررات موجود (مخصوصا در FiT) ✓ خط قرمز در پیش شرط لازم برای دسترسی به بازار ✓ عدم آگاهی از فناوری در میان تصمیم گیرندگان		موانع دسترسی به بازار
✓ به طور کلی کمبود آگاهی برای سلول های ثابت ✓ فقدان دانش و اعتماد به مارک های جدید در صنعت ✓ نگرانی های امنیتی مربوط به سلول های سوختی (به عنوان مثال در H2)		موانع پذیرش
✓ عدم اطمینان در مورد مسائل محیط زیست (به عنوان مثال طبقه بندی ErP) ✓ پیچیدگی کلی تنظیم مقررات شبکه، استانداردهای شبکه گاز، طرح های حمایت عمومی و غیره ✓ اثرات نامطلوب سیاست های موجود (EEG در آلمان)		مانع تنظیم سازی

سطح سختی: متوسط متوسط تا بالا بالا

بازار پیل‌های سوختی یک مکان بدون پیشرفت باقی مانده است. در حالی که این فن آوری کارایی خود را ثابت کرده است ، بزرگترین مانع پیش‌روی این طرح عمر محدود این تکنولوژی است.

کمک‌های مالی برای پیشرفت و تولید بیشتر این فناوری به ما کمک می‌کند اما برای پیشرفت همیشگی، سلول‌های سوختی باید مقرون به صرفه شوند. برای انجام این کار، باید بر سه مانع اصلی غلبه شود:

(۱) ارائه بهره‌وری بالاتر از سوخت‌های فسیلی

(۲) به اندازه کافی عمر طولانی باشد که هزینه‌های اولیه بیشتر از صرفه جویی در انرژی نباشد

(۳) قابل خرید با هزینه‌ای که برای مصرف کنندگان قابل قبول است

(۷) فصل

بررسی برنامه‌های کشورها و شرکت‌های
تولید کننده SOFC

۷-۱) مقدمه

توسعه پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) از اواخر دهه ۱۹۵۰ آغاز شد. روند توسعه این پیل سوختی با توجه به مزایای چشمگیر در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های موجود به سرعت رو به افزایش گرفته است. در حالی که وجود نقاط گلوگاهی (فصل قبل) سبب چالش‌هایی در بهبود و تجاری‌سازی SOFC ها شده است. شرکت‌های گوناگونی در جهان (مخصوصاً در آمریکای شمالی، اروپا و آسیا) در تلاش برای بهبود و تجاری‌سازی هستند. در این فصل به صورت اجمالی به بررسی این شرکت‌ها و وضعیت کنونی این پیل‌ها در جهان خواهیم پرداخت.

۷-۲) قاره آمریکا شمالی [14]:

۷-۲-۱) Atrex Energy

در سال ۲۰۱۵، با رشد سریع بازار محصولات قدرت از راه دور، Atrex Energy به عنوان یک شرکت مستقل تشکیل شد. هدف از Atrex Energy، گسترش پروژه‌های SOFC و همچنین توسعه و تجاری کردن محصولات جدید تولید انرژی است. از سال ۲۰۰۰، Atrex Energy بیش از ۱۰۰ میلیون دلار صرف تحقیق و توسعه یک ژنراتور قدرتمند از راه دور تجاری با استفاده از SOFC کرده است. Atrex Energy پیشرفت قابل توجهی در بهبود تکنولوژی در این دوره زمانی داشته است:

- افزایش ۱۲۰ برابری خروجی بر واحد لوله‌ی سلول سوختی
- توسعه طرح‌های SOFC با خروجی پیک بیش از ۱۰ کیلو وات؛ در اولین SOFC فقط ۲۰ وات قدرت را تولید کرد.
- سه برابر کردن چگالی قدرت
- توسعه ۱۵ نوآوری ثبت شده

یکی از مشکلات اصلی در طراحی لوله‌ای پیل‌های سوختی اکسید جامد، گرادیان دما بوده که سبب آسیب‌های فاجعه باری می‌شود. یکی از ویژگی‌های کلیدی طراحی SOFC توسط Atrex Energy شکل واقعی لوله‌ای سلول سوختی است که توانسته مشکل گرادیان دما را حل کند.



شکل ۷-۱ طراحی لوله‌ای SOFC، Artrex Energy و اصول کارکرد [51]

Bloom Energy (۷-۲-۲)

این شرکت در سال ۲۰۰۱ تأسیس شد. Bloom Energy سیستم‌های SOFC قابل اعتماد با کارایی بالا را توسعه و تجاری‌سازی می‌کند. این شرکت در همکاری با دانشگاه تنسی (ایالات متحده آمریکا)، یک سیستم ۵ کیلووات تولید کرد که در سال‌های ۲۰۰۶ تاکنون در مکان‌های مختلفی از جمله کالیفرنیا، آلاسکا و تنسی مورد آزمایش قرار گرفته است. در دوره‌ای که از نوامبر ۲۰۰۶ تا دسامبر ۲۰۰۹ در همکاری با وزارت انرژی ایالات متحده انجام شد، فعالیت‌های تحقیق و توسعه به سوی تولید یک سیستم متصل به شبکه ۲۵ کیلوواتی برای تولید برق و هیدروژن هدایت شد. واحدهای مورد آزمایش به مدت بیش از ۵۰۰۰ ساعت کار می‌کردند. این شرکت در طول این سال‌ها سیستم‌های خود را در ۱۴ اندازه توسعه داده است، تولید سرورها: ES-5000، ES-5400 و ES-5700، که به ترتیب قدرت ۱۰۰، ۱۰۵ و ۲۱۰ کیلووات را دارا می‌باشند. قلب این سرورها با استک‌های ۱ کیلوواتی با برجسب Bloom Boxes ساخته شده است که شامل ۴۰ سلول ۲۵ وات است که هر کدام با سوخت طبیعی یا سوخت زیستی سوخت‌گیری کرده و بیش از ۵۰٪ راندمان الکتریکی خالص را به دست می‌آورند.



شکل ۷-۲ UPM-570 با خروجی برق اسمی ۱۶۰ کیلووات [52]

Ceramatec (۷-۲-۳)

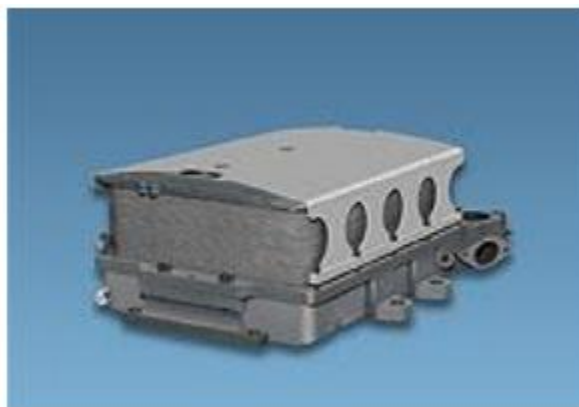
Ceramatec پیشگام تحقیق و توسعه در انواع فن‌آوری‌های مبتنی بر یون‌های حالت جامد سرامیکی و سیستم‌های الکتروشیمیایی مانند سنسورهای اکسیژن، تولید اکسیژن، تولید مواد شیمیایی و سلول‌های سوختی اکسید جامد است. Ceramatec دارای بیش از دو دهه تجربه در توسعه و آزمایش سیستم‌های پیل سوختی اکسید جامد است. استک‌ها (اندازه KW) با استفاده از انواع سوخت‌های مختلف مانند گاز طبیعی، اصلاح شده JP-8 و غیره مورد آزمایش قرار گرفته است. مواد الکتrolیتی مورد بررسی شامل زیرکونیا تثبیت کننده یون‌های اکسیژن، سرامیک دوتایی و لانتانیم گالات دوتایی و سیمان باریم دوتایی است. برنامه این شرکت در توسعه پل‌های سوختی مبتنی بر تکیه‌گاه آند است. Ceramatec در حال بررسی چند راه حل مختلف در زمینه ذخیره‌سازی انرژی تجدیدپذیر است.



شکل ۷-۳ پیل سوختی Ceramtec تک سلولی پایه آندی [53]

Delphi (۷-۲-۴)

پیل‌های سوختی اکسید جامد تولید شده توسط این شرکت برای کار با بسیاری از انواع سوخت از جمله گاز طبیعی، دیزل، سوخت زیستی، پروپان، بنزین، سوخت ذغال سنگ و سوخت وسایل نظامی طراحی شده است. دلفی در سال ۱۹۹۸ کار خود را بر روی سلول‌های سوختی اکسید جامد آغاز کرد و آن به عنوان یکی از رهبران این فن‌آوری شناخته شده است. دلفی با صنعت خصوصی و موسسات آموزشی علمی در توسعه فن‌آوری سلول سوختی اکسید جامد مشارکت داشته و از وزارت انرژی U.S. و وزارت دفاع آمریکا برای توسعه سلول‌های سوخت کمک مالی گرفته است. دلفی در نسل چهارم استک‌های پیل سوختی تولیدی خود می‌تواند ۹ کیلووات برق را تامین کند که دارای یک طراحی مدولار بوده و ایده آل برای ادغام در نیروگاه‌های بزرگ است.



شکل ۷-۴ استک SOFC دلفی [54]

استک Generation-4 دارای ۴۰۳ سانتی متر مربع منطقه فعال، با کیفیت بالا و قدرت قابل اعتماد (۱۱۰ VAC و / یا ۱۲ VDC)، با بهره‌وری الکتریکی بین ۴۰ تا ۵۰ درصد است. سیستم را می‌توان بر روی چندین سوخت شامل گاز طبیعی، دیزل، بیو دیزل، پروپان، بنزین و زغال سنگ سین گاز اجرا کرد. برنامه اصلی این شرکت توسعه پیل‌های سوختی اکسید جامد مبتنی بر تکیه‌گاه آند مستطیلی است.

۵-۲-۷ Fuel Cell Energy

یکی از بزرگترین توسعه دهنده‌های سیستم سلول‌های سوختی کربنات مذاب (MCFC) در جهان، Versa Power کانادایی است که از سال ۲۰۰۴ به طور مداوم تکنولوژی SOFC خود را پیشرفت داده است. به این ترتیب Fuel Cell Energy (FCE) دانش خود را در مورد سیستم‌های سلول سوختی، به ویژه در مورد نیروگاه‌های چند مگاواتی برای گرمایش و تامین برق شهری، به منظور ارزیابی در مقیاس قدرت کوچکتر SOFC را برای این هدف برگزید و در حال توسعه می‌باشد. امکانات توسعه SOFC بین کالگری (CAN) و دانبری (CT) تقسیم شده است.



شکل ۵-۷ بلوک ساختمان پایه استک: FCE / Versa SOFC اندازه سلول ۲۵x۲۵ سانتی متر مربع، ۱۲۰ سلول، ۶۸٪ استفاده سوخت، ۲۵-۷۰٪ اصلاح در استک، تقریباً ۱۶ کیلو وات قدرت برقی برق DC [55]

FCE اجزای SOFC (استک‌های پیل سوختی) را به عنوان بخشی از پروژه FCE تحت برنامه (SECA¹) ایالات متحده قرار داده است. برنامه SECA دارای یک هدف بلند مدت برای معرفی سیستم‌های مبتنی بر SOFC با کارایی بالا و آلاینده‌گی پایین با عملکرد بر روی گازهای زغال سنگ در اندازه‌های صدها مگاوات می‌باشد.

هم‌چنین نیروی دریایی ایالات متحده ارزیابی استفاده از نیروی SOFC برای استفاده در کشتی و زیردریایی بدون سرنشین را به علت آلودگی کم، راندمان بالا، عملکرد با صدای کم و گاز طبیعی ارزیابی می‌کند. طراحی سیستم شامل اجزای جدید (BOP) و استراتژی‌های عملیاتی / کنترل برای بهبود استقامت و قابلیت اطمینان استک SOFC، از پروژه‌های اصلی این شرکت می‌باشد.

۶-۲-۷ Materials and systems Research, Inc. (MSRI)

MSRI یک پیشگام جهانی در زمینه تحقیق و توسعه مواد است. تخصص آن شامل موارد زیر است:

- تکنولوژی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) - تولید کم آلاینده، تولید توان الکتروشیمیایی با کارایی بالا
- تکنولوژی الکترولیز تولید هیدروژن - تولید هیدروژن در مقیاس کوچک
- β -alumina - مورد استفاده در باتری‌ها و راکتورهای هسته‌ای
- فناوری باتری قابل شارژ - برای کاربردهای با درجه حرارت بالا
- تکنولوژی سنسور - سنسورهای گازی چند جزئی
- فن آوری Si-C با قابلیت کارآمد - می‌تواند یک گشتاور ۶,۸۰۰ lbs مقاومت کند.

MSRI سلول‌های سوختی با تکیه‌گاه آند با قدرت چگالی بسیار بالا قدرت با استفاده از بهینه‌سازی میکروساختار الکترودها توسعه داده است.

طرح لوله‌ای تکیه‌گاه آند در شکل ۶-۷ نشان داده شده است. این پیل سوختی می‌تواند در چرخه‌های حرارتی متعددی استفاده شود و بدون ترک خوردن می‌تواند به سرعت (به عنوان مثال، ظرف چند دقیقه) گرم شود.



شکل ۶-۷ بسته‌بندی ۳۶ لوله برای یک واحد قدرت قابل حمل ۳۰۰ وات [56]

¹ State Energy Conversion Alliance

Protonex (۷-۲-۷)

در سال ۲۰۰۰ با هدف توسعه و بازاریابی واحدهای PEMFC تاسیس شد. در سال ۲۰۰۷ شرکت Mesoscopic Devices LLC، شرکتی که در تحقیق و توسعه تکنولوژی SOFC، اصلاح سوخت و سیستم‌های سولفوریزاسیون فعالیت می‌کرد، منافع تجاری خود را به فناوری SOFC تبدیل کرده است.

Protonex سیستم‌های SOFC را بر اساس تکنولوژی پیل‌های لوله‌ای با استحکام بالا در کاربردهای قابل حمل و موبایل توسعه می‌دهد، یکی از SOFC‌های تولیدی این شرکت P200i است (شکل ۷-۷).



شکل ۷-۷ P200i [57]

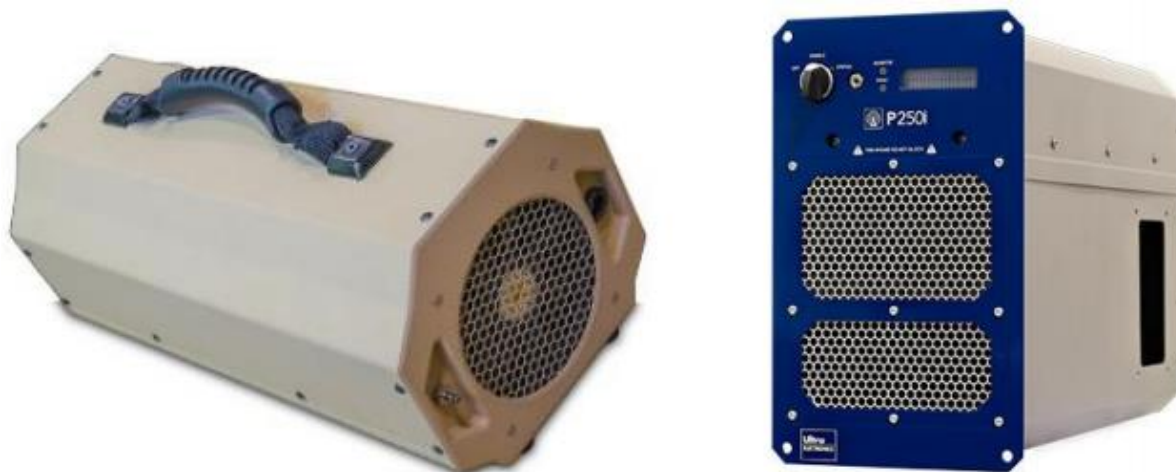
P200i به راحتی با پانل‌های خورشیدی برای به حداقل رساندن مصرف سوخت کوپل شده و اجزای این پیل سوختی نسبت به سایر SOFC‌ها در چرخه‌های بیشتر و ساعت عملکرد بالاتر مقاومت بیشتری دارد و از سوخت پروپان ارزان و آسان استفاده می‌کند. P200i از همه نوع معمول باتری‌های سرب اسید و لیتیوم پشتیبانی می‌کند.

Ultra USSI (۷-۲-۸)

در سال ۱۹۹۳ در آرپور^۱ تاسیس شد. این شرکت بین‌المللی دفاع، امنیت، حمل و نقل و انرژی است. در سال ۲۰۱۱ Ultra، یک توسعه صنعتی از SOFC‌های کوچک با استفاده از تکنولوژی میکرو لوله‌ای، به دست آورد. این شرکت به همراه وزارت دفاع ایالات متحده توانست کاربرد سیستم‌های SOFC قابل حمل را در سال ۲۰۰۱ نشان دهند. این شرکت از آن زمان به بعد سیستم‌های SOFC انعطاف پذیر، قابل مقرون به صرفه و قابل حمل را توسعه داده، که بیشتر مشتریان و شرکای آن‌ها نظامی هستند.

¹ Arbor

USI ۴۵ دستگاه D300 برای هواپیماهای بدون سرنشین (پهپادی) به کار گرفته شده توسط ارتش آمریکا در سیستم های هوایی بدون سرنشین تحویل داده است.



شکل ۷-۸

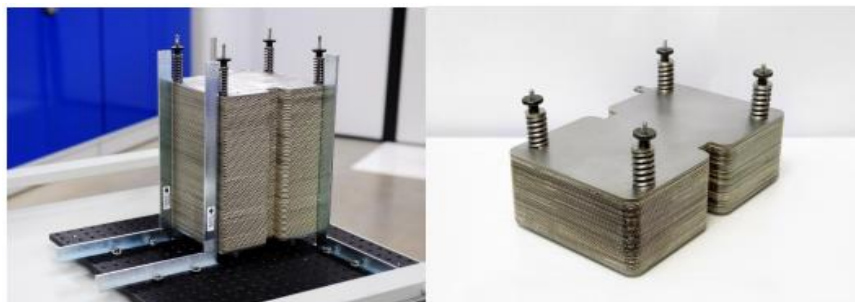
USI D350 (245 W, 6"H x 16"L x 8"W, 5.1 kg, 134g/h propane) and P250 (250 W, 13"H x 17"L x 7"W, 10.7 kg, propane or natural gas-fuelled) [58]

۷-۳) قاره اروپا [14]

Elcogen (۷-۳-۱)

در استونی و فنلاند واقع شده است و در سال ۲۰۰۱ در استونی تاسیس شد. Elcogen یک شرکت خصوصی است که بر روی تجاری سازی سلول های SOFC تکیه گاه آند کار می کند. تکنولوژی SOFC این شرکت برای عملکرد در دمای ۶۰۰-۷۰۰ درجه سانتی گراد بهینه شده است. طول عمر مورد انتظار ۲۰۰۰۰ ساعت است.

Elcogen در حال توسعه تکنولوژی پیل و استک با موسسات تحقیقاتی استونی و فنلاند KBTI و VTT است. آن ها استک های پیل سوختی ۱ کیلووات Elcogen را پیشنهاد می کنند. استک های پیل سوختی اکسید جامد Elcogen در دمای ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد کار می کنند. آن ها بر اساس نسل جدیدی از طراحی، طراحی شده اند که بر راندمان بالا، عمر طولانی، مواد کم هزینه و تولید مقرون به صرفه تمرکز دارند.



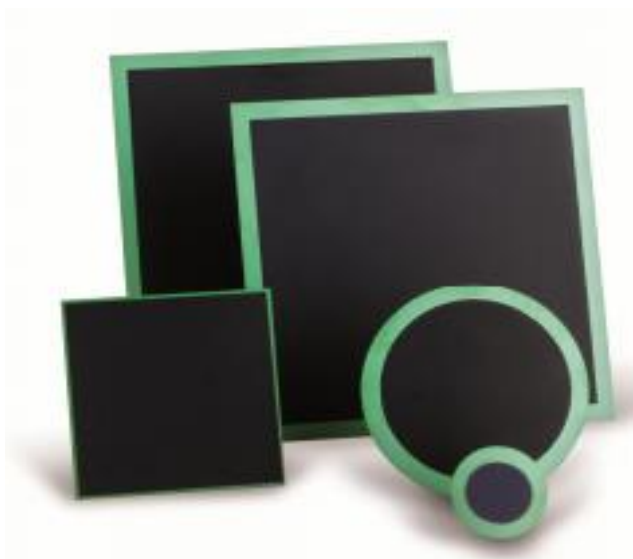
شکل ۷-۹ چپ استک E3000, 3kW ، راست استک E1000, 1kW [59]

خصوصیات عملکرد استک های E1000 و E3000 در جدول ۵۵۵ نشان داده است.

جدول ۷-۱ مقایسه استک E1000 و E3000 شرکت Elcogen

	E3000	E1000
Rated power [W]	3000	1000
Number of unit cells [pcs]	39	119
Maximum voltage (OCV,H 2) [V]	47	141
Minimum voltage [V]	27	81
Nominal current [A]	30	30
Maximum current [A]	40	40
Air utilization	0.12-0.3	0.12-0.3
Maximum fuel utilization	0.7	0.7
Maximum degree of internal reforming	0.65	0.65
Maximum temperature[°C]	720	720
Maximum inlet temperature for air [°C]	580	580
Maximum temperature difference [°C]	100	100
Maximum working pressure [mbar]	50	50

این شرکت به تولید پیل‌های براساس تکیه‌گاه آند مشغول بوده و نشان دادند که تکنولوژی پیل‌های تکیه‌گاه آند، حتی در درجه حرارت پایین، کارایی و دوام بسیار عالی را ارائه می‌دهد. این پیل‌ها را می‌توان در ضخامت، شکل یا اندازه‌های مختلف تولید کرد و همراه با کنترل دقیق کیفیت، نیازهای خاص مشتریان برآورده می‌شود.

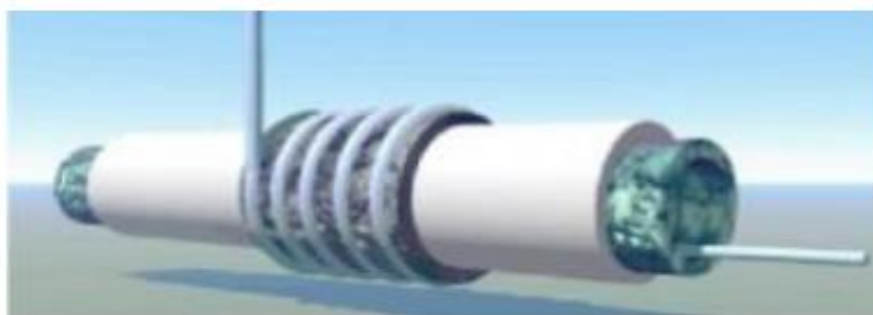


شکل ۷-۱۰ پیل سوختی شرکت Elcogen [59]

Cell show 5.5% degradation after 1000 h @ 60% fuel utilization and 650 °C
operating temperature with a reformat mixture of 15% CH₄, 26% CO₂, 29% H₂, 30% H₂O

Adelan (۷-۳-۲)

یک شرکت پیشگام در تکنولوژی پاک در سال ۱۹۶۶ در انگلستان به وسیله پروفیسور کندل^۱ تاسیس شد. تیم Adelan دارای مهارت و توانایی طراحی است و به توسعه سیستم‌های میکرو-توان در کاربردهای مختلف می‌پردازند.



شکل ۷-۱۱ SOFC میکرو لوله‌ای Adelan [60]

^۱ Kendall

مهارت‌های فنی Adelan در ویژگی ساختاری مربوط به سیستم‌های SOFC، پردازش مواد، آزمایش SOFC و استفاده از سوخت‌های مختلف از جمله هیدروکربن‌ها هستند.

تولیدات این شرکت دارای تولید توان الکتریکی ۲۵۰ وات و توان گرما بالای ۱ کیلووات است. زمان شروع به کار پیل‌های سوختی این شرکت در حدود ۱۰-۲۰ دقیقه، عملکرد ۳۰۰۰ ساعت است. یکی از مزیت‌های پیل سوختی این شرکت هزینه و وزن کم تولیدات SOFC در مقایسه با باتری‌ها است. این شرکت در حال توسعه پیل‌هایی با طول عمر بالاتر و افزایش بازده است.

۷-۳-۳ Bosch Thermotechnology

در سال ۱۸۸۶ در آلمان تاسیس شده است. این شرکت عمدتاً پیل‌های سوختی "مرکزهای انرژی" برای خانه‌های تک و دو خانواده تولید می‌کند. Bosch در همه تکنولوژی‌های گرمایشی و آب گرم فعالیت می‌کند. اصلی‌ترین محصول آن‌ها CERAPOWER است که در شکل ۷-۱۲ نشان داده شده است.

Energy Center	
Dimensions, WxHxD [mm]	1220*80*600
Weight [kg]	220
Fuel Cell	
Power output [W]	700
Thermal output [W]	700
Electrical efficiency [%]	45
Overall efficiency [%]	90

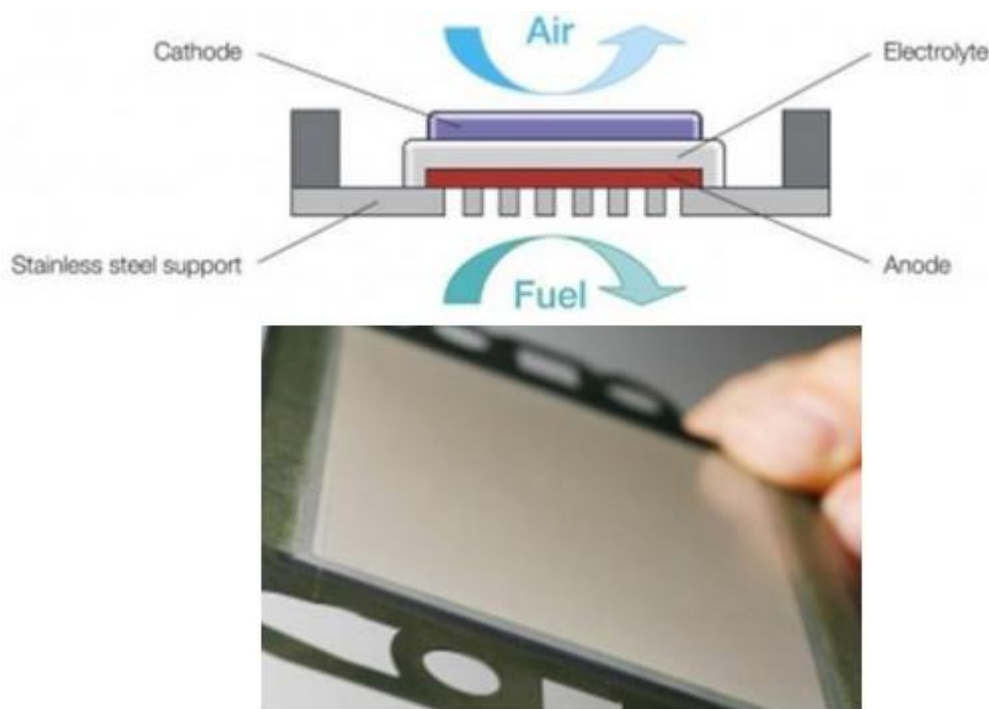


شکل ۷-۱۲ BOSCH's Cerapower energy center [61]

Ceres Power (۷-۳-۴)

در انگلستان واقع شده است و در ماه مه سال ۲۰۰۱ تاسیس شد. امروز Ceres Power، سیستم‌های micro-CHP SOFC برای بخش مسکونی و کاربردهای امنیتی انرژی توسعه می‌دهد. Ceres Power روابطی با شرکای صنعتی مانند British Gas، Calor Gas و Bord Gáis ایجاد کرده و توسعه داده است.

پیل‌های سوختی Ceres که به ثبت رسیده‌اند از نوع تکیه‌گاه فلز^۱ (فولاد ضد زنگ) می‌باشد که این نوع پیل دارای مزایایی از جمله زمان شروع به کار سریع و عملکرد در تعداد زیادی از چرخه‌های روشن/خاموش با تخریب کم است. محدوده دمای کاری آن‌ها ۵۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است که به طور قابل توجهی پایین‌تر از پیل‌های طراحی شده مرسوم است که معمولاً حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند. این کاهش دما به خاطر تکیه‌گاه فلز (اجازه استفاده از اجزای بسیار کاتالیزوری نازک و فعال) می‌باشد و استفاده از نسل جدید مواد سرامیکی شناخته شده به عنوان CGO (سریم گادولینیم اکسید) به جای استاندارد صنعتی YSZ (زیرکونیا تثبیت شده با اتریا) امکان‌پذیر است.



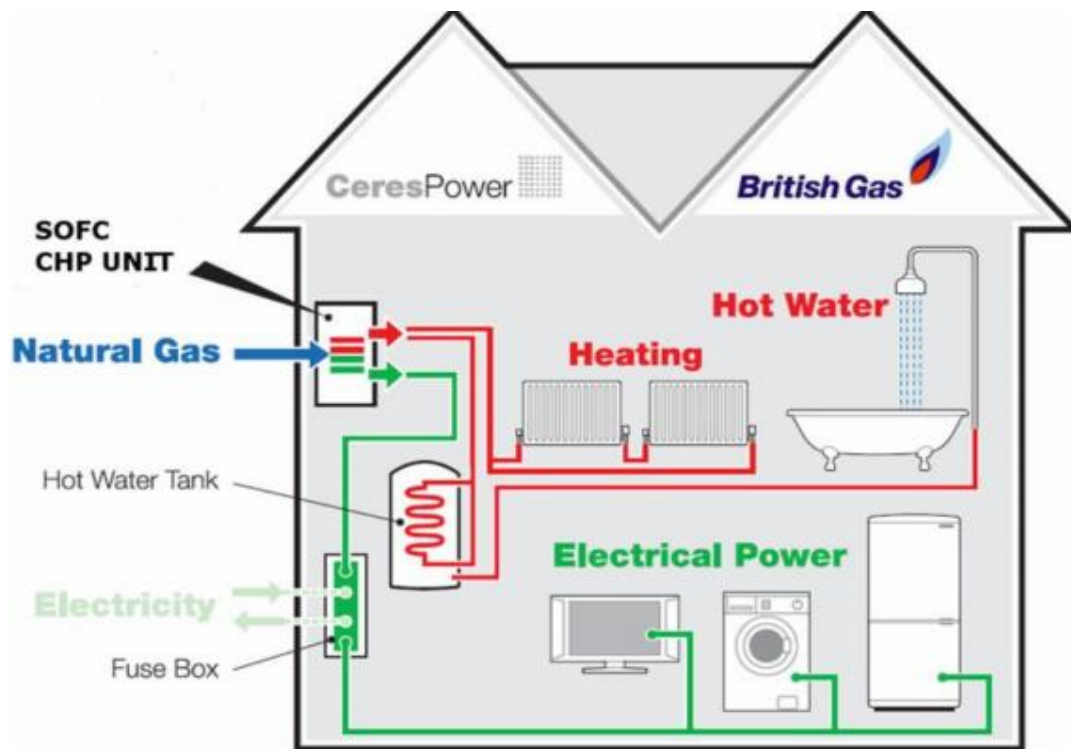
شکل ۷-۱۳

Detail of Ceres Power's single, metal-supported fuel cell, allowing extremely thin active layers and low temperature operation [62]

Ceres اعلام کرده، محصول میکرو CHP توانایی بالقوه تجاری شدن از سال ۲۰۱۸ به بعد را دارد. این شرکت در حال آزمایش و توسعه و بهبود پیل‌های تولیدی خود است.

¹ metal-supported

شماتیکی از استفاده سیستم SOFC CHP در یک خانه مسکونی در شکل ۷-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۷-۱۴ Ceres Power fuel cell integration concept in residential environment [62]

۵-۳-۷ Convion Ltd

این شرکت در سال ۲۰۱۲ تأسیس شد و در ماه ژانویه سال ۲۰۱۳ برنامه پیل سوختی شرکت Wärtsilä را در دست گرفت و توسعه و تجاری‌سازی محصولات بر پایه تکنولوژی سلول سوختی اکسید جامد را به عنوان یک شرکت مستقل ادامه داد. شرکت Convion Ltd یکی از پیش‌گامان توسعه سیستم‌های سلول سوختی است که متعهد به فروش پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFC) در محدوده توان ۵۰ تا ۳۰۰ کیلووات برای تولید توان بوسیله گاز طبیعی یا بیوگاز است.



شکل ۷-۱۵ Convion's C50 product: a 50 kWe CHP generator with 53% electrical efficiency [63]

جدول ۷-۲ مشخصات محصول C50 شرکت Convion [63]

Performance	Targets
Net power output	58 kW (3x400-440V AC 50/60 Hz)
Energy efficiency (LHV) Electrical (net,AC) Total (exhaust 40 °C)	> 53% >80%
Heat recovery Exhaust gas flow Exhaust gas temperature	650 kg/h 222 °C
Emissions NO _x Particulates (PM10) CO ₂ (NG, nominal load) CO ₂ (with heat recovery)	< 2 ppm <0.09 mg/kWh 354 kg/MWh 234kg/MWh
Fuels	Natural gas, City gas, Biogas
Dimensions (LxWxH) Power unit Auxiliary equipment	3,5 x 1,9 x 2,3 m 2,4 x 0,6 x 2,2 m
Noise level	< 70 dB (A) at 1 m
Installation Ambient temperature	Indoor/outdoor -20 -+ 40 °C

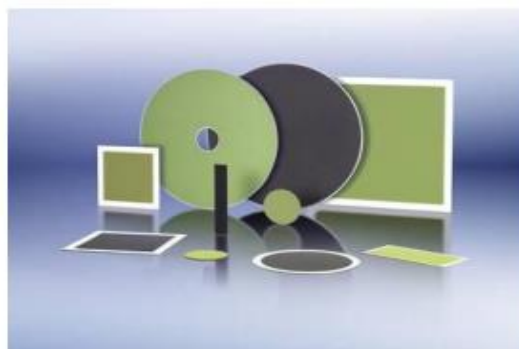
Kerafol GmbH (۷-۳-۶)

در سال ۱۹۸۵ در آلمان تاسیس شد. شرکت Kerafol Keramische Folien GmbH متخصص فویل^۱ سرامیک و تولیدکننده عمده‌ی سرامیک‌ها است. آن‌ها به تولید محصولات سرامیکی متخلخل برای پیل‌های سوختی می‌پردازند. این محصولات در انواع مختلفی از کاربردها مانند میکرو الکترونیک، تصفیه، فن آوری حسگر، پیل‌های سوختی SOFC و تکنولوژی LTCC استفاده می‌شود.

Kerafol پیل‌های سوختی مبنی بر تیکه‌گاه الکترولیت^۲ ارائه می‌دهد. در این نوع پیل، الکترولیت جزء اصلی ساختار است. دمای عملکرد این نوع ۷۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد است.

¹ foils

² electrolyte supported



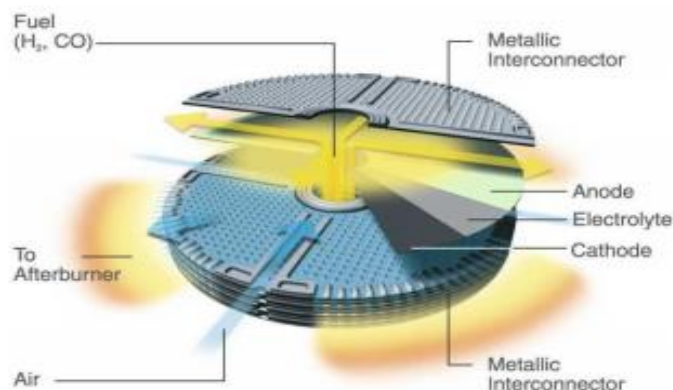
شکل ۷-۱۶ چاپ تنوع زیرلایه‌های الکترولیت، راست پیل‌های با تکیه‌گاه الکترولیت [64]

پیل‌های سوختی این شرکت دارای پهنای بالایی هستند و برای استفاده در استک SOFC بهینه می‌شوند. این شرکت در حال توسعه بر روی الکترودهای بسیار کارآمد با مقاومت کم است. استحکام پیل‌ها با چندین آزمایش طولانی مدت، توسط چرخه‌های حرارتی و آزمایش‌های اکسیداسیون / کاهش اثبات شده است. Kerafol همچنین نوع سلول KeraCell III را تولید می‌کند که بر اساس یک الکتروکاتد اکسیژن LSCF است.

۷-۳-۷ Hexis / Viesmann

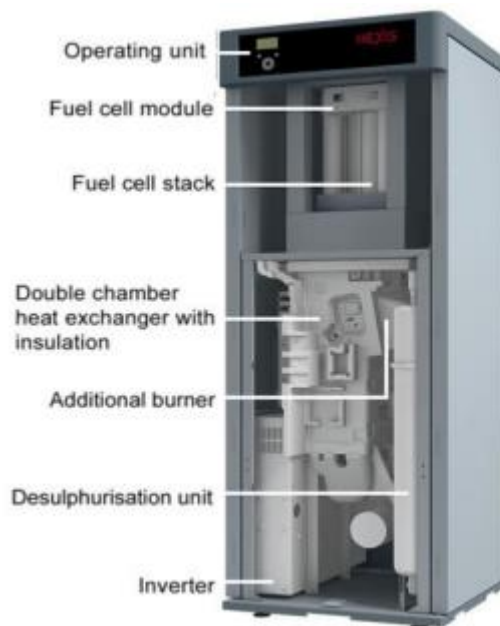
در سال ۱۹۹۷ به عنوان بخش سرمایه‌گذاری شرکت مهندسی Swiss تاسیس شد و در سال ۲۰۰۶ مستقل شد. Hexis مجموعه CHP مبتنی بر SOFC را برای کاربردهای ثابت با نیازهای الکتریکی زیر ۱۰ کیلووات را توسعه می‌دهد.

این شرکت تکنولوژی SOFC صفحه‌ای را برای حالت طراحی دایره‌ای توسعه می‌دهد. نمونه‌ای از این نوع طراحی در شکل ۷-۱۷ نشان داده شده است. سوخت از بخش آند پیل از طریق مرکز دیسک به صورت شعاعی به بیرون جریان می‌یابد. هوای پیش گرم شده مسیر مشابهی را در سمت کاتد دنبال می‌کند.



شکل ۷-۱۷ اصول کار پیل سوختی Hexis [65]

محصولات تجاری آن‌ها Galileo 1000N است که از نمونه استک ساخته شده از حدود ۶۰ سلول استفاده می‌کند و می‌تواند به وسیله گاز طبیعی یا زیستی متان تغذیه شود. خروجی برق اسمی ۱ کیلووات است و خروجی حرارتی ۲ کیلووات است و بهره‌وری الکتریکی آن تا ۳۵٪ و حداکثر بهره‌وری کلی ۹۵٪ (LHV) است. Galileo 1000N همچنین یک مشعل کمکی ۲۰ کیلو وات را برای تکمیل تامین نیازهای حرارتی یک خانه یا یک آپارتمان کوچک در نظر می‌گیرد.



شکل ۷-۱۸ The Hexis Galileo 1000N m-CHP model [65]

۸-۳-۷ mPower GmbH

یک شرکت مستقر در هزن^۱ است که در سال ۲۰۱۵ برای تجاری ساختن استک SOFC توسعه یافته توسط Fraunhofer IKTS و Plansee تشکیل شده است. mPower مجوز جهانی را برای تولید و تجاری دارد. mPower GmbH در حال توسعه ژنراتورهای قدرت ۱ kW، ۲ kW، ۵ kW و ۱۰ kW برای کاربردهای توان ثابت است.

این شرکت بر روی ایجاد عمر طولانی (در حال حاضر ۲۰,۰۰۰ ساعت نشان داده شده)، سهولت ترکیب استک در داخل سیستم و کاهش هزینه‌ها برای ایجاد اعتماد در تجاری‌سازی متمرکز شده است. استک‌هایی که توان خروجی بیش از ۳۰۰ کیلو وات دارند، به مشتریان تجاری فروخته می‌شود و این شرکت در حال آماده‌سازی راه‌حلهایی برای صنایع مختلف صنعتی در ایالات متحده آمریکا، اروپا و هند است.

^۱ Dresden-based

جدول ۷-۳ ویژگی‌های استک تولیدی mPower GmbH [14]

Available Power Output Range in W	250 to 1200
Weight in kg	3.3 to 13.6
Operating Temperature in °C	780 to 860
System Compatibility	Compatible to partial oxidation, steam and autothermal reformers
Internal Reforming of CH ₄ in %	up to 32
Fuel utilization in %	up to 85

استک‌های ساخته شده به وسیله این شرکت به استحکام، قابلیت اطمینان و کارایی معروف هستند.



- Reliability and Design Simplicity
- Innovative & Solution Based Approach
- Cost Reduction & Affordability
- Global Industry Standard
- Frugal Engineering
- Operational Efficiency

شکل ۷-۱۹ مشخصه‌های کلیدی استک‌های mPower [14]

Plansee SE (۷-۳-۹)

در سال ۱۹۲۱ تأسیس شد و در اتریش واقع شده است. گروه Plansee به طور کامل در تولید، پردازش و بازاریابی فلزات نسوز مقاوم شده پیشگام است. این شرکت پیشگام در تولید SOFC با تکیه‌گاه فلزی است.



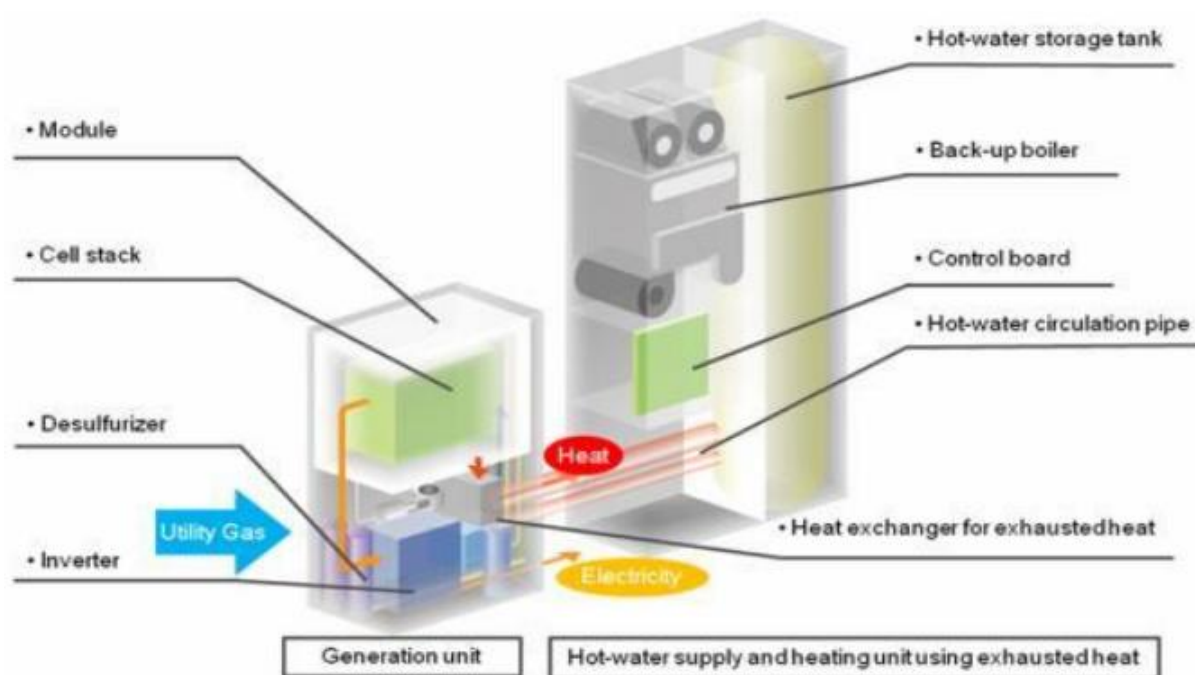
شکل ۷-۲۰ پیل تکیه‌گاه فلزی Plansee [66]

این شرکت این نوع پیل سوختی را برای کاربردهای موبایل تولید می‌کند. این پیل سوختی دارای وزن کم و زمان شروع به کار پایین می‌باشد. Plansee از یک فرایند متالورژیکی پودر شامل یک آلیاژ ۲۶٪ Fe-Cr برای تولید هر تکیه‌گاه متخلخل برای سلول فعال الکتروشیمیایی و اتصالات استفاده می‌کند.

۷-۴) قاره آسیا [14]

Aisin Seiki (۷-۴-۱)

در سال ۱۹۶۵ با دفتر مرکزی در Aichi، ژاپن، تاسیس شد. آن‌ها یک مفهوم نوآورانه از پیل‌های صفحه‌ای و لوله‌ای تولید می‌کنند که بین ۷۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد عمل می‌کنند. ژاپن دارای یک کمپین بزرگ در حال گسترش سیستم‌های micro-CHP است که نام آن ENE-FARM بر اساس تکنولوژی‌های PEFC (سلول سوختی الکترولیت پلیمر) و SOFC است.



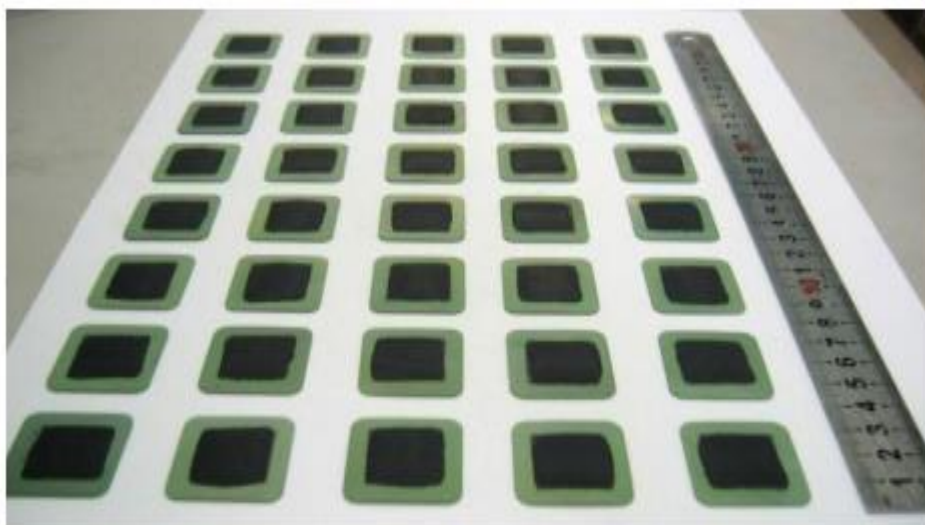
شکل ۷-۲۱ شماتیکی از An Ene Farm type S m-CHP system [10]

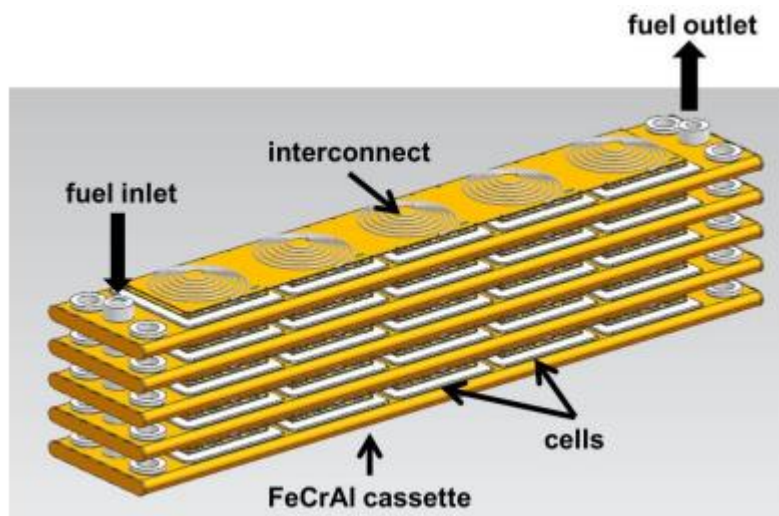
جدول ۷-۴ ENE-Farm Type S (SOFC-based) for residential fuel cell CHP specifications [10]

ENE-FARM RESIDENTIAL FUEL CELL CHP		
Selling date: April 27, 2012		
Basic Function	Rated power output	700 W
	Power output range	5 ~ 700 W
	Power generation efficiency	46.5% (LHV)
	Overall efficiency	90% (LHV)
	Operation temperature range	-10 ~ 43 °C
	Start-up time	120 ~ 180 min
	Operation time	24 hrs continuous
	Hot-water tank capacity	90 litres
	Hot-Water Temperature	~ 70 °C
	Installation	outdoor
	Voltage	100 V (50/60Hz)
Dimensions	Power Generating Unit	600 W × 935 H × 335 D (mm)
	Hot-Water Supply and Heating Unit using Exhausted Heat	740 W × 1,760 H × 310 D (mm)
Weight	Power Generating Unit	96 kg
	Hot-Water storage Unit	94kg (188kg in operation)
Installation Space		Approx. 1.9 m ² (Approx. 1.6 m ² with side exhaust gas cover)
Standard Price (incl. taxes and excl. installation cost)		¥2,322,000

G-cell Technology Co., LTD (۷-۴-۲)

در سال ۲۰۱۳ در چین تاسیس شده است. این شرکت در حال بهبود و توسعه آب‌بندی بین سلول SOFC و تکیه‌گاه فلزی است و توانسته با استفاده از ارتباطات سری و موازی به استک SOFC دست یابد.





شکل ۷-۲۲ استک و سلول‌های SOFC تکنولوژی G-cell [67]

h2e Power Systems Inc. (۷-۴-۳)

این شرکت واقع در پونا (هند) و نیویورک (U.S.A)، در سال ۲۰۱۲ تاسیس شد. انتقال دانش و فن آوری به منظور تسهیل تولید و تجاری‌سازی دستگاه‌های محلی در هند توسط شرکت h2e Power Systems از سال ۲۰۱۶ آغاز شده است. در سال ۲۰۱۵ اولین سیستم سلولی سوخت اکسید جامد (دو سیستم نمونه) توسط Fraunhofer IKTS توسط h2e Power Systems Inc. توسعه داده شده است. در طول عملکرد با گاز طبیعی، نمونه اولیه به شاخص‌های عملکرد کلیدی در نظر گرفته شده با تولید توان برق بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ ولت و بهره‌وری خالص برق حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد رسید.

محدوده محصول‌های تولید h2e بخش‌های مختلف بازار را مورد هدف قرار می‌دهد:

- تجاری: h2e می‌تواند ژنراتور سلول سوختی ۱-۱۰ kWe را برای بیمارستان‌ها، ساختمان‌های اداری، مدارس/کالج‌ها، برج‌های مخابراتی و شرکت‌های کوچک/متوسط و صنایع کوچک فراهم کند.
- مسکونی: h2e می‌تواند ژنراتورهای سلول سوختی ۰.۵-۵ kWe را برای آپارتمان‌ها، ویلاها، خانه‌های کوچک، متوسط و روستایی فراهم کند.
- کشاورزی: h2e می‌تواند ژنراتور سلول سوختی ۱-۳ کیلووات را برای پردازش مواد غذایی، ذخیره‌سازی سرد، خانه سبز و مزارع فراهم کند.



شکل ۷-۲۳ Artist's impression of a h2e Power Generator [68]

۷-۴-۴ Mitsubishi-Hitachi Heavy Industries (MHI)

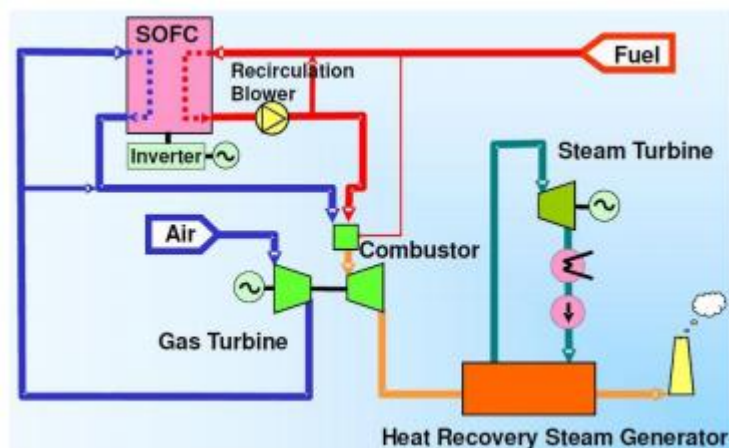
در سال ۱۹۱۴ تاسیس شد و یک شرکت چند ملیتی مهندسی، تجهیزات الکتریکی و الکترونیک است که مقر آن در توکیو، ژاپن است.

MHI در حال توسعه یک میکروتوربین-پیل سوختی اکسید جامد ترکیبی ۲۵۰ کیلووات در یک سیستم ترکیبی سه گانه است و در حال حاضر نمونه‌ای از این سیستم در دانشگاه کیوشو آیوتو^۱ کار می‌کند.



شکل ۷-۲۴ سیستم کوپل شده SOFC-microturbine 250kW توسط MHI [69]

¹ Kyushu Ito



شکل ۷-۲۵ Mitsubishi در حال توسعه سیستم SOFC-turbine triple combined cycle [69]

۷-۴-۵ POSCO Energy

در سال ۱۹۶۹ به عنوان شرکت Kyung-In Energy تأسیس شد و در سال ۲۰۰۵ به خانواده POSCO پیوست. در حال حاضر یک تامین کننده جامع انرژی است که در چهار حوزه کلیدی انرژی فعالیت دارد: تولید برق، انرژی تجدیدپذیر، سلول سوختی و توسعه منابع. دفتر مرکزی POSCO Energy در شهر سئول، کره جنوبی است. بخش سوخت سلول POSCO Energy در شهر Pohang واقع شده است.

آن‌ها برای کاربردهای ثابت MCFC و SOFC تولید می‌کنند. POSCO ENERGY محصولات مختلف سلول‌های سوختی را از ۱۰۰ kW تا ۲.۵ MW تولید می‌کند تا طیف وسیعی از محصولات سلول‌های سوخت به مشتریان خود ارائه دهد. در حال حاضر محصولات ۱۰۰ kW، ۳۰۰ kW و ۲.۵ MW را تولید می‌کند و همچنین محصولات دیگر را برای مناطق مختلف و همچنین نسل بعدی فناوری SOFC را توسعه می‌دهد.



شکل ۷-۲۶ نسل بعدی محصولات SOFC 300 kW [14]

۵-۷) وزارت انرژی آمریکا [70]

همان‌طور که در بخش قبلی (قاره آمریکا شمالی) نشان دادیم شرکت‌ها و سرمایه‌گذاری‌های زیادی بر روی تحقیق و توسعه پیل‌های سوختی اکسید جامد در کشور آمریکا شده است (شکل ۷-۲۷). از جمله برنامه‌های پیل سوختی اکسید جامد توسط وزارت انرژی آمریکا، طراحی و ترکیب تکنولوژی SOFC با سایر سیستم‌ها و ماژول‌ها و تست سیستم‌ها و استک‌های بزرگ‌تر است.

➤ Cell Development

Argonne National Lab
Boston University*
Case Western Reserve*
Glacigen
Georgia Tech*
HAMR
Kettering University
Massachusetts Institute of Tech.
Michigan State Univ
Montana St. University*
NETL - RIC
Oak Ridge National Lab
Pacific Northwest Natl Lab

Pneumaticcoat
PolarOnyx
Saint-Gobain
Sonata
SMI
Stanford
Tennessee Tech. Univ.*
University of Connecticut*
University of Maryland
University of Pennsylvania*
University of South Carolina*
West Virginia University*

➤ Core Technology

Atrex*
Auburn University
General Electric
HifFunda
Michigan State Univ.
Mohawk*
National Renewable Energy Lab
NexTech

Oak Ridge National Lab
Pacific Northwest National Lab
Redox Power
Sonata
University of Pittsburgh
U.S. Department of the Navy
West Virginia University

➤ Systems Development

Atrex
Cummins
FuelCell Energy*
General Electric

LG Fuel Cell Systems*
Redox Power*
University of California San Diego

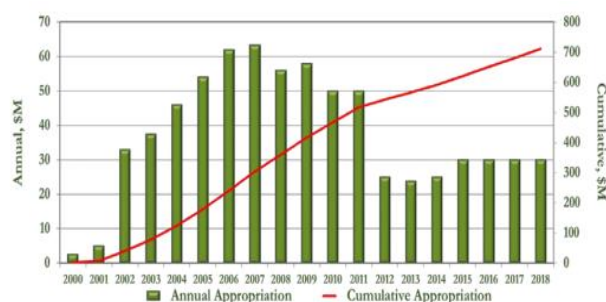
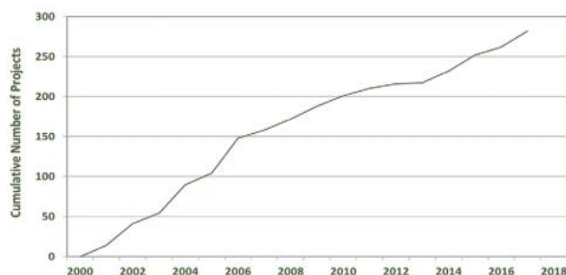


شکل ۷-۲۷ شرکت‌های توسعه‌دهنده پیل سوختی اکسید جامد در آمریکا [70]

➤ FY18 DOE Appropriation: \$30M

➤ Cumulative Funding (FY00 – FY18)

- DOE ~\$712M
- Participant Cost Share ~\$265M



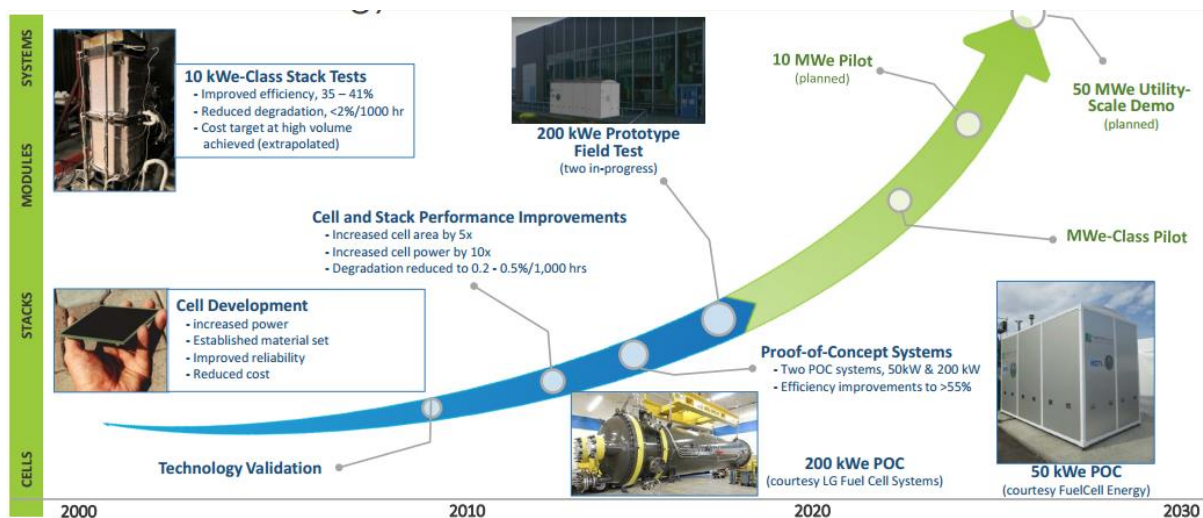
➤ Total Number of Awards >290

➤ Total Number of Participants 116

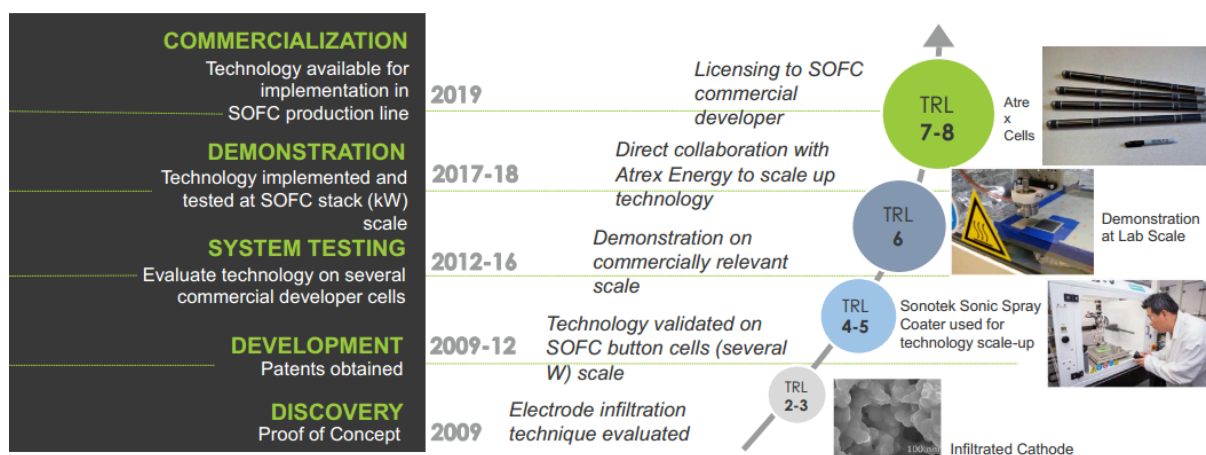
- Industry 66
- Academia 40
- National Labs/Agencies 10

شکل ۷-۲۸ میزان سرمایه‌گذاری توسط وزارت انرژی آمریکا و شرکت‌ها در طول سال‌های مختلف [70]

در شکل ۷-۲۹ روند تکامل سیستم پیل سوختی اکسید جامد توسط وزارت انرژی آمریکا نشان داده شده است.



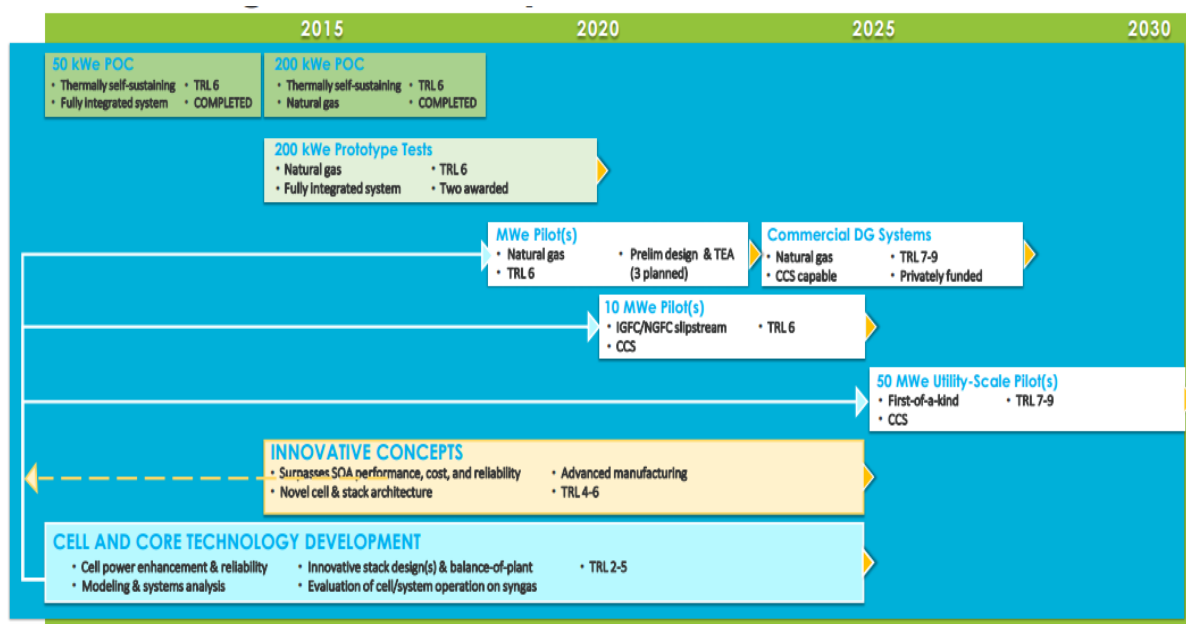
شکل ۷-۲۹ روند تکامل SOFC [70]



شکل ۷-۳۰ روند تجاری سازی تا سال ۲۰۱۹ [70]

Metric	Current	2020 Target	2025/2030 Target
System Cost (100 kW- 1MW)	>\$12,000/kWe	\$6,000/kWe	\$900/kWe
Single Cell Degradation	0.2 - 0.5% per 1,000 hrs		
Cell Manufacturing Approach	Batch	Semi- Continuous	Continuous
System Degradation	1 - 1.5% per 1,000 hrs	0.5 - 1.0% per 1,000 hrs	<0.2% per 1,000 hrs
Fuel Reformation	Primarily external natural gas conditioning/reforming	100% integrated natural gas reformation inside cell stack	
Durability	<2,000 hrs	5,000 hrs	5 years
Platform	Proof-of-Concept	Prototype/Pilot	DG: Commercial Utility-scale: Pilot
Configuration	Breadboard/Integrated systems	Fully packaged	Fully packaged
Fuel	Natural gas	Natural gas Simulated syngas	Natural gas Coal-derived syngas
Demonstration Scale	50 kWe - 200 kWe	200 kWe - 1 MWe	DG: MWe-class Utility-scale: 10 - 50 MWe

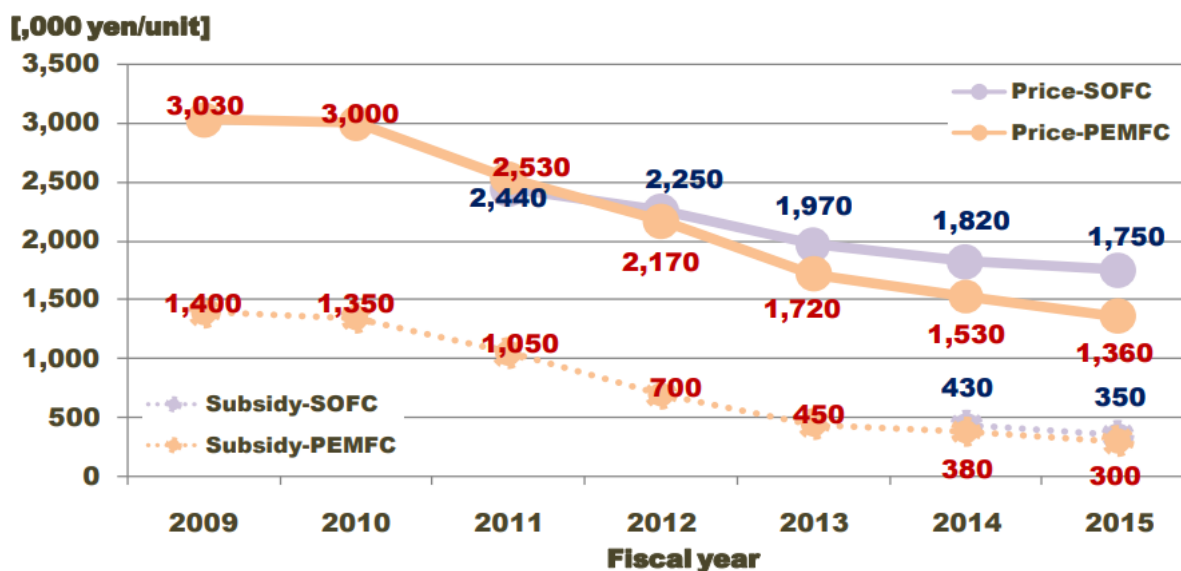
شکل ۷-۳۱ اهداف برنامه های SOFC [70]



شکل ۳۲-۷ خط زمان توسعه برنامه SOFC [70]

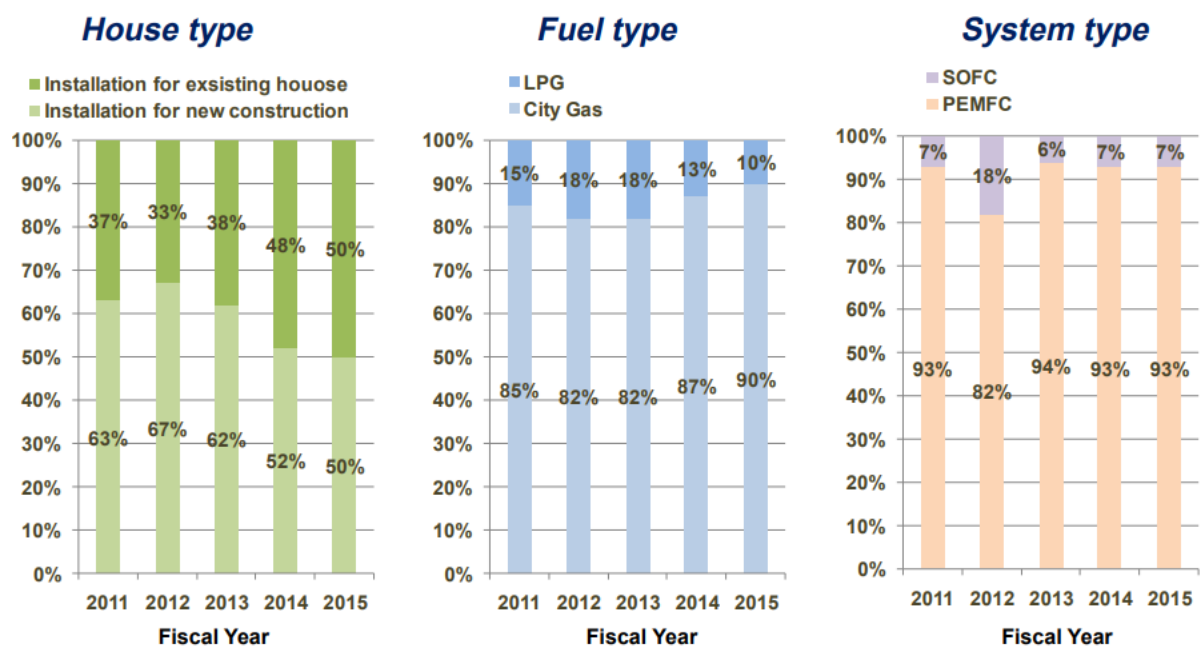
۶-۷ برنامه‌های کشور ژاپن

یکی از برنامه‌های پیوسته در برنامه‌های ژاپن، کاهش هزینه‌های نهایی پیل سوختی است (شکل ۷-۳۳).



شکل ۳۳-۷ قیمت نهایی پیل سوختی و کاهش آن [71]

میزان استفاده از سیستم‌های SOFC و PEM در شکل از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ نشان داده شده است.

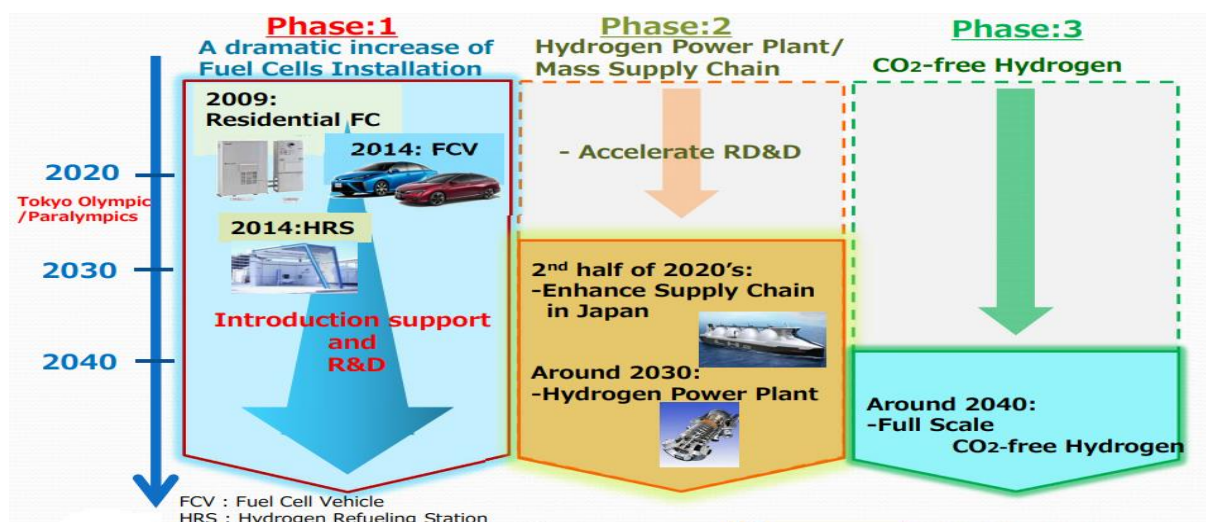
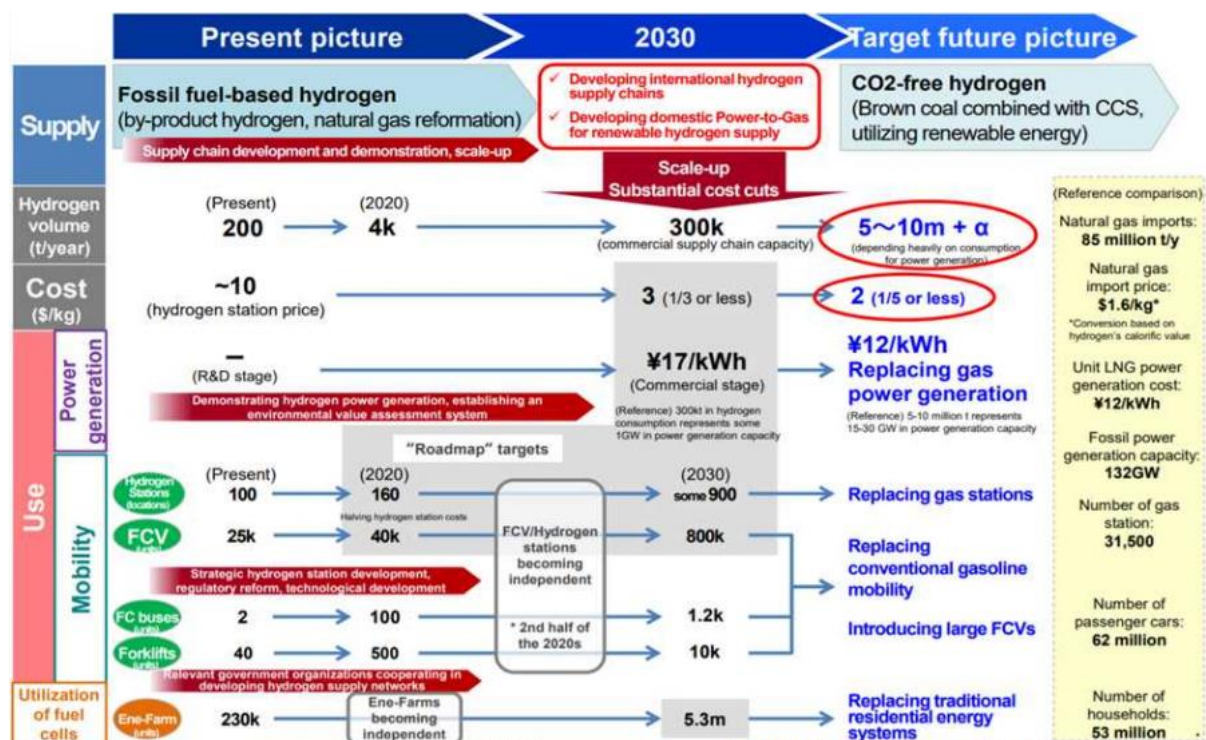


شکل ۷-۳۴ تکفیک میزان استفاده از نوع سیستم، نوع سوخت و نوع خانه [71]

کشور ژاپن سرمایه‌گذاری و برنامه‌های بلند مدت در بخش انرژی نو توسط (NEDO^۱) انجام داده است. عمده این برنامه‌ها بر روی هیدروژن و پیل سوختی است. در ادامه نقشه راه توسعه این سیستم‌ها و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بررسی خواهد شد.

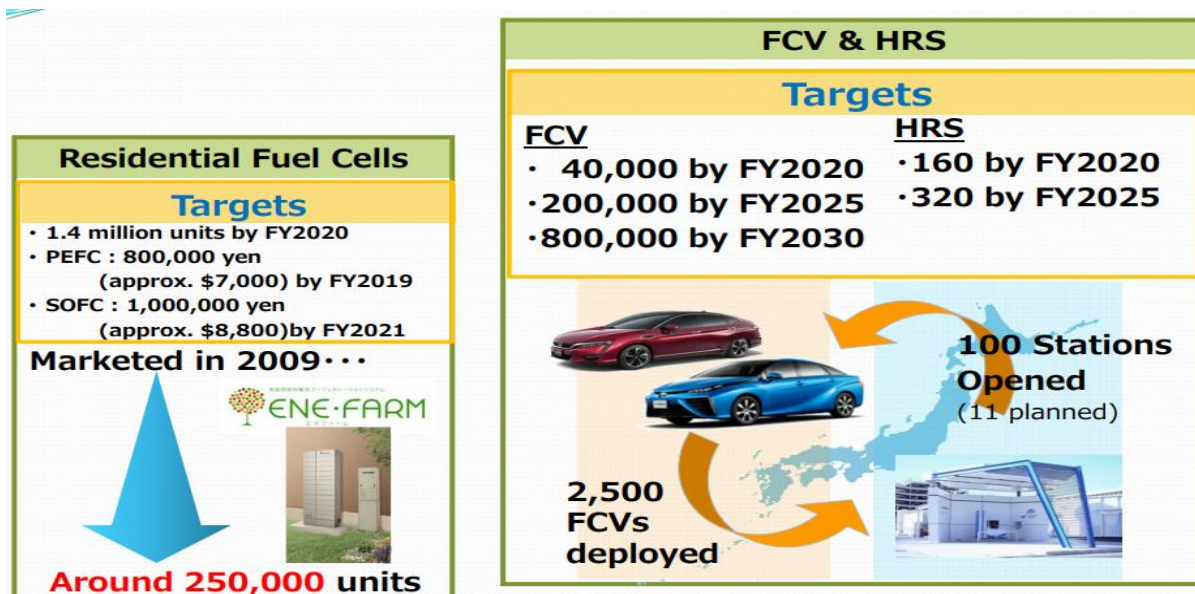
سازمان NEDO ژاپن سه مرحله برای توسعه و کاهش هزینه‌ها در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ در نظر گرفته است (شکل ۳۵-۷).

^۱ New Energy and Industrial Technology Development Organization

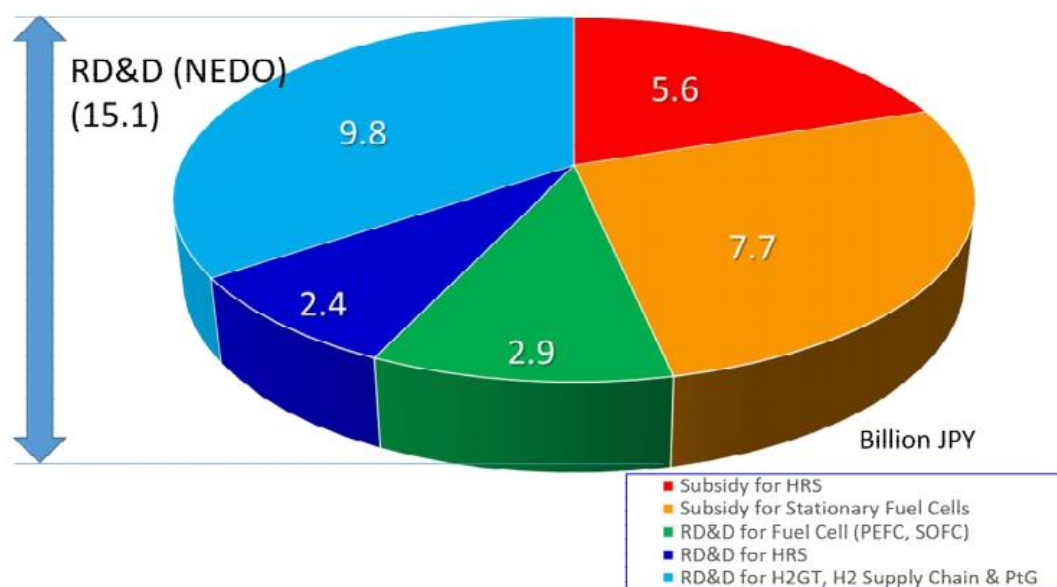


شکل ۳۵-۷ نقشه راه توسعه هیدروژن و پیل‌های سوختی در ژاپن [71]

وضعیت کنونی و اهداف پیش‌رو در صنعت و خودروسازی در شکل ۳۶-۷ نشان داده شده است. در حال حاضر حدود ۲۵۰۰ وسیله نقلیه از سیستم پیل سوختی استفاده می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۳۰ به ۸۰۰۰۰ برسد.



شکل ۷-۳۶ وضعیت کنونی و اهداف پیش‌رو استفاده از پیل سوختی در صنعت [71]
 بودجه در نظر گرفته شده در سال ۲۰۱۸ برای پیل‌های سوختی و هیدروژن در شکل ۷-۳۷ نشان داده شده است.

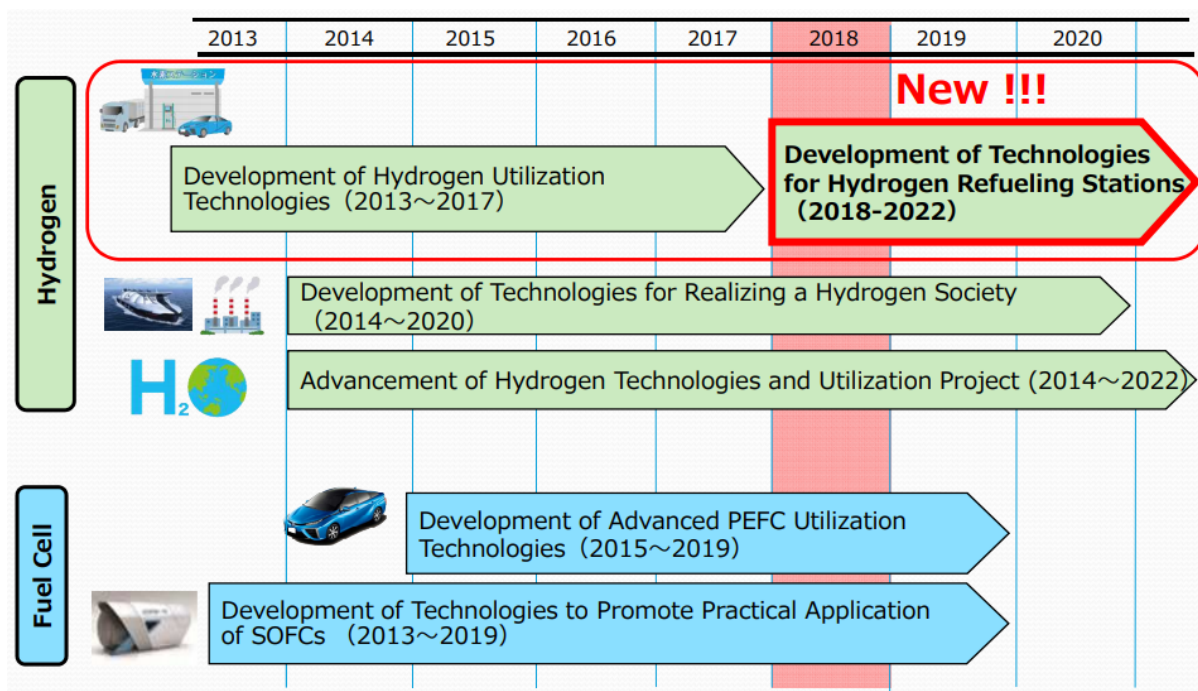


METI's Total: 28.4 billion JPY (260 million US\$)

Not including subsidy for FCV

شکل ۷-۳۷ بودجه ۲۰۱۸ NEDO برای پیل سوختی و هیدروژن

چشم‌انداز برنامه‌های سازمان NEDO تا سال ۲۰۲۰ در شکل ۷-۳۸ نشان داده شده است. ژاپن برنامه‌هایی برای توسعه و پیشرفت تکنولوژی SOFC و PEFC تا سال ۲۰۱۹ در نظر گرفته است.



شکل ۷-۳ چشم انداز برنامه‌های جاری NEDO [71]

در سال ۲۰۱۹ دو همایش در ژاپن در مورد پیل‌های سوختی اکسید جامد برگزار خواهد شد:

۱) شانزدهمین همایش بین‌المللی پیل‌های سوختی اکسید جامد

شانزدهمین همایش بین‌المللی پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFC-XVI) در کیوتو، ژاپن در ۸-۱۳ سپتامبر ۲۰۱۹ در کیوتو ترستا برگزار خواهد شد. این همایش بین‌المللی دانشمندان، مهندسان و محققان از آزمایشگاه‌های دانشگاهی، صنعتی و دولتی را برای به اشتراک گذاشتن نتایج و بحث در مورد مسائل مربوط به پیل‌های سوختی اکسید جامد و الکترولیزر گرد هم می‌آورد. این جلسه فرصتی برای یادگیری و تبادل اطلاعات در مورد آخرین پیشرفت‌های علمی و فنی مربوط به SOFC ها فراهم می‌کند [72]. هدف این همایش:

- مواد اجزای پیل (به عنوان مثال الکترولیت‌ها، الکترودها و اتصالات)
- روش‌های ساخت و ساز اجزای پیل، استک
- طراحی پیل، عملکرد الکتروشیمیایی و مدل‌سازی
- طرح‌های استک و عملکرد آن‌ها
- استفاده از سوخت‌های مختلف با اصلاح یا بدون اصلاح
- تولید توان ثابت و حمل و نقل
- نمونه اولیه سیستم‌های SOFC، آزمایش، هزینه و وضعیت تجاری
- SOEC، یا الکترولیز آب درجه حرارت بالا با الکترولیت اکسید جامد

۲) بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی تکنولوژی پیل سوختی اکسید جامد

بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی فناوری پیل سوختی اکسید جامد با هدف جمع‌آوری دانشمندان، محققان و پژوهشگران برجسته علمی برای تبادل تجربیات و نتایج تحقیقات در مورد تمام جنبه‌های فناوری پیل سوختی اکسید جامد به اشتراک گذاشتن آن‌ها است. همچنین یک پلت فرم میان رشته‌ای برای محققان، متخصصان و مربیان ارائه می‌دهد تا تازه‌ترین نوآوری‌ها، روند و نگرانی‌ها و همچنین چالش‌های عملیاتی و راه حل‌های اتخاذ شده در زمینه فناوری سوخت جامد اکسید را ارائه و مورد بحث قرار دهند [73].

۷-۷) جمع‌بندی

۷-۷-۱) وضعیت کنونی تکنولوژی پیل سوختی در جهان و ایران [74]

با توجه به مزایای این فن‌آوری، طرح استفاده از اتوبوس پیل سوختی، با حمایت سازمان ملل در بسیاری از کشورها نظیر چین، هند، برزیل، مصر و مکزیک در دست مطالعه یا اجراست و سرمایه‌گذاری عظیمی در جهت تحقیق و توسعه بر روی آن انجام گرفته و می‌گیرد. با مقایسه انواع فناوری‌ها نظیر اتوبوس پیل سوختی، اتوبوس گازسوز (CNG, LNG) و اتوبوس برقی، طرح اتوبوس پیل سوختی در کشورهای مختلف به لحاظ بازده، کاهش مصرف سوخت و کاهش هزینه تعمیرات و نگهداری، به عنوان برترین گزینه انتخاب گردیده است.

به منظور تحقیق و توسعه در زمینه خودروهای با نیروی محرکه پیل سوختی، خودروسازان بزرگ دنیا اقدام به سرمایه‌گذاری‌های کلان و تدوین برنامه‌های درازمدت و عقد قرارداد همکاری با یکدیگر نموده‌اند. به عنوان نمونه شرکت دایملر کرایسلر به منظور توسعه خودروهای پیل سوختی با شرکت بلارد^۱ قرارداد همکاری بسته است که در این همکاری مشترک، پیل سوختی مورد نیاز این شرکت را بلارد تامین می‌کند. دایملر بنز (دایملر کرایسلر فعلی) از سال ۱۹۹۴ تست‌های جاده‌ای خود را بر روی نسل اول خودروهای با نیروی محرکه پیل سوختی آغاز کرده و تا کنون ۵ نسل از خودروهای پیل سوختی با توان‌های مختلف آزمایش کرده است.

بسیاری از سازندگان نیروگاه‌ها، سیستم پیل سوختی را جهت نصب در نیروگاه‌های آینده برنامه‌ریزی کرده‌اند. پیل سوختی در آینده نزدیک منبع تامین نیرو برای مناطق حساس نظیر بانک‌ها، مراکز معاملات سهام، بیمارستان‌ها و مراکز سیستم‌های کامپیوتری خواهد بود و به عنوان پشتیبان برای شبکه‌های مالی بکار برده خواهد شد. در ایران نیز مراکز تحقیقاتی و علمی کشور نظیر سازمان انرژی‌های نو ایران (در زمینه طراحی و نمونه‌سازی پیل نوع پیل سوختی)، مراکز تحقیقاتی ایران خودرو (برقی نمودن خودروهای بنزینی)، طرح خودرو وزارت صنایع (تحقیقات کاربردی)، دفتر همکاری‌های فناوری ریاست جمهوری (ساخت نمونه پیل

¹ Ballard

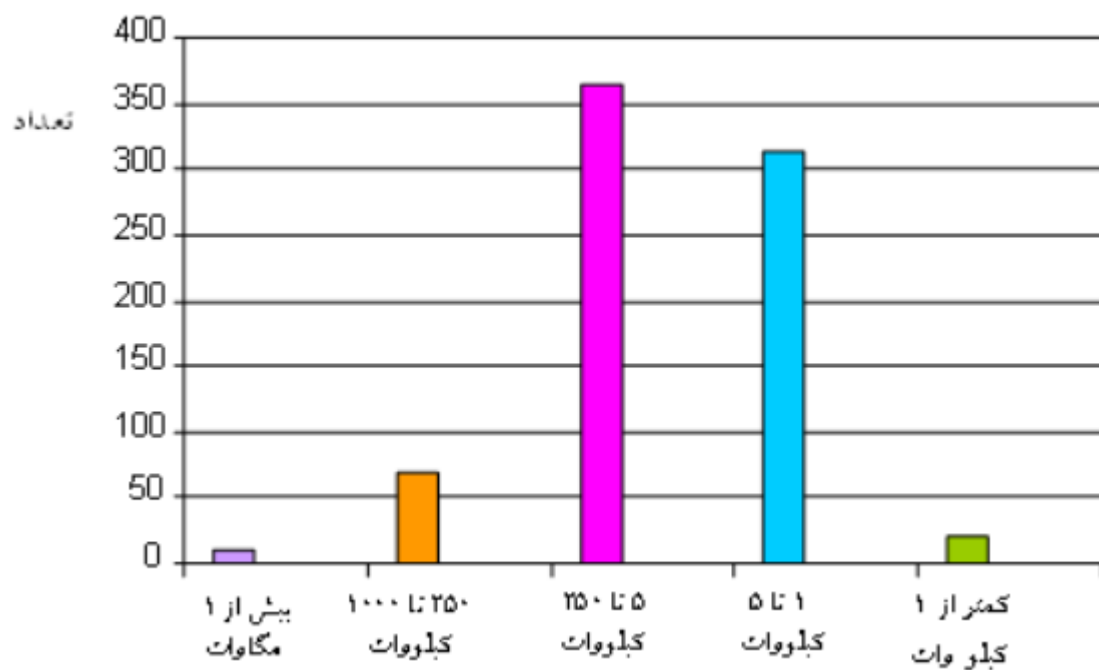
سوختی)، سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران، پژوهشکده سبز دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه صنعتی شریف و مراکز تحقیقاتی بخش خصوصی مانند مراکز تحقیقات دانا، و شرکت فناوری هیدروژن هزاره سوم پروژه‌های مختلفی در زمینه انواع نیروی مارکه مورد نیاز خودروهای برقی، خصوصا پیل سوختی را آغاز نموده اند.

ردیف	کشور محل نصب	تعداد
۱	آمریکا	۳۸۰
۲	کانادا	۲۱
۳	انگلیند	۲۰
۴	آلمان	۱۵
۵	فرانسه	۱۵
۶	ایتالیا	۱۴
۷	هلند	۱۳
۸	ژاپن	۱۳
۹	سوئیس	۹
۱۰	کره جنوبی	۹

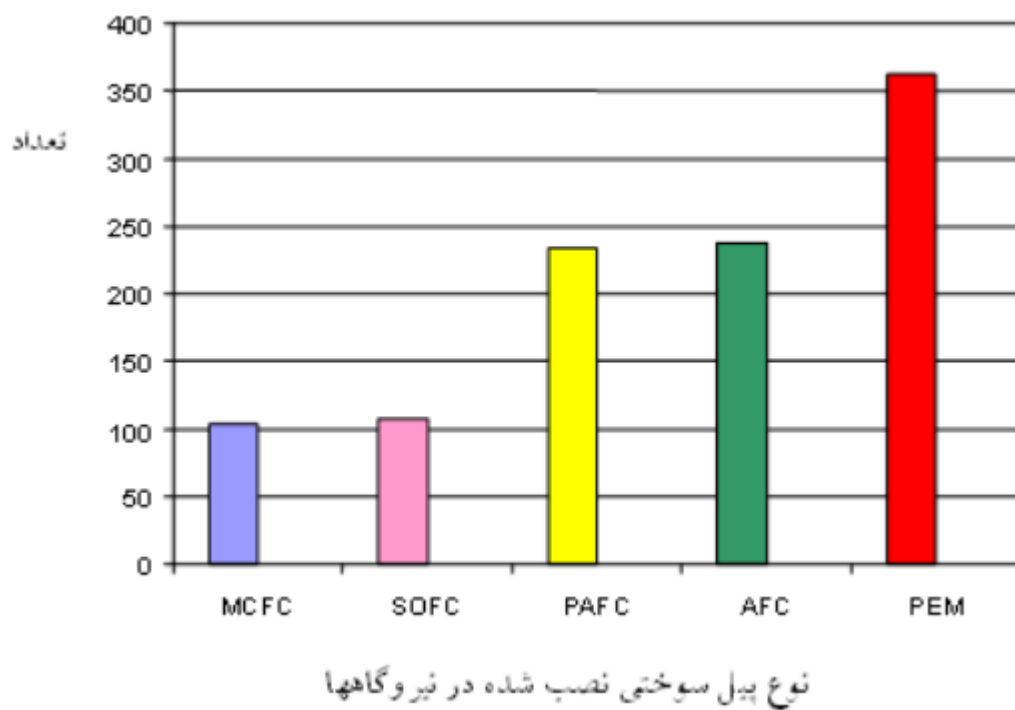
ردیف	کشور محل نصب	تعداد
۱۱	اسپانیا	۸
۱۲	سوئد	۷
۱۳	آفریقای جنوبی	۶
۱۴	استرالیا	۶
۱۵	برزیل	۵
۱۶	اتریش	۵
۱۷	نیوزلند	۳
۱۸	روسیه	۲
۱۹	هند	۲
۲۰	فنلاند	۲

ردیف	کشور محل نصب	تعداد
۲۱	دانمارک	۲
۲۲	بلژیک	۲
۲۳	قطر جنوب	۱
۲۴	Cayman islands	۱
۲۵	بهاماس	۱
۲۶	چین	۱
۲۷	ایسلند	۱
۲۸	نروژ	۱
۲۹	پرتغال	۱
۳۰	اسلواکی	۱
۳۱	لوگزامبورگ	۱
۳۲	پورتوریکو	۱
۳۳	ترکیه	۱

شکل ۳۷-۷ سهم کشورهای جهان از نیروگاه‌های پیل سوختی [74]



شکل ۳۸-۷ تعداد ظرفیت نصب شده نیروگاه‌ها در جهان [74]



شکل ۳۹-۷ سهم انواع پیل سوختی به کار رفته در نیروگاه‌های جهان [74]

آینده متصور برای این فناوری و پیشنهادهایی برای ایران

۸-۱) آینده متصور برای SOFC

پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFC) دستگاه‌های الکتروشیمیایی هستند که انرژی شیمیایی سوخت و اکسیدان را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. از آنجا که SOFC ها از طریق واکنش الکتروشیمیایی، الکتریسیته تولید می‌کنند و فرایند احتراقی انجام نمی‌شود، بسیار کارآمدتر و مطلوب‌تر از فرایندهای تولید برق معمولی هستند. ویژگی‌های ذاتی این تکنولوژی، آن‌ها را منحصر به فرد در مسائل محیط زیست، تغییرات آب و هوا و مسائل مربوط به آب در ارتباط با تولید برق مبتنی بر سوخت فسیلی می‌سازد.

بازار جهانی پیل سوختی اکسید جامد در طول مدت زمانی پیش‌بینی شده از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۵ رشد چشم‌گیری خواهد داشت. برخی از روندهای برجسته‌ای که بازار جهانی شاهد آن است، تقاضای روزافزون تولید انرژی با راندمان بالا است؛ پروژه‌های آینده بر ذخیره‌سازی انرژی هیدروژن و پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی در پیل سوختی اکسید جامد متمرکز شده است [75].

پیل‌های سوختی اکسید جامد در مسیر پیشرفت دارای تعدادی موانع هستند، اما با توجه به کاربردهای متنوع و ساختارهای متفاوت این تکنولوژی می‌توان SOFC ها را در آینده انرژی کشورها متصور شد. به طور بالقوه این پیل‌های سوختی اکسید جامد ممکن است جایگزین سایر پیل‌های سوختی در آینده شود [76].

Stratistics MRC برآورد می‌کند که بازار کل پیل‌های سوختی در سال ۲۰۲۴ به ارزش ۲۳ میلیارد یورو خواهد بود و بازار SOFC در سال ۲۰۱۵ به ارزش ۲,۶ میلیارد دلار بوده است و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۲، ارزش آن به ۴,۹ میلیارد دلار برسد. در حالی که بازار جهانی پیش‌بینی ۲۵,۵ میلیارد دلار پیل‌های سوختی و ۳ میلیارد دلار SOFC را در سال ۲۰۲۴ کرده است [75] [77].

این اعداد امیدوار کننده هستند، که نشان می‌دهد صنعت پیل‌های سوختی در آستانه دستیابی به موفقیت تجاری است. برآورد میزان استفاده از پیل‌های سوختی به شدت بستگی به روند پیشرفت صنعت و شور و شوق مصرف کنندگان، کسب و کار و دولت دارد.

در شرایط کنونی SOFC جایگاه ۱۵ سال پیش PV رو دارد. در حال حاضر، هزینه بالای فن آوری پیل سوختی - به علت درجه حرارت بالا - یکی از موانع اصلی این تکنولوژی است. اکنون چالش این است که هزینه‌ها را کاهش دهیم، که اکثر آن‌ها از طریق آوردن دمای عملیاتی به کمتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آیند. طرح‌های جدید که اجازه می‌دهد که دمای عملیاتی پایین‌تر باشد از طرفی هزینه‌های چند سال آینده را بهبود می‌بخشد و هم چنین باعث افزایش بهره‌وری و طول عمر خواهد شد که در نتیجه سیستم‌های SOFC برای تولیدکنندگان سودمند می‌شوند و هم برای سرمایه‌گذاران و بازرگانان بازدهی ایجاد می‌کنند [76].

۲-۸) پیشنهادهایی برای ایران

۱. سرمایه‌گذاری برای تبدیل شدن به قطب تولید SOFC
این موضوع با چالش‌هایی در کشور ما رو به رو می‌شود. ابتدا باید نگاهی به توانایی ساخت و روش آن انداخته شود که آیا تکنولوژی‌های ساخت (فصل ۴) در کشور موجود است یا نیاز به سرمایه‌گذاری و تحقیقات در برای ایجاد روش‌های ساخت می‌باشد.
۲. رصد دنیا در پیشرفت SOFC
ابتدا تا زمانی که جواب چالش‌ها و موانع تجاری شدن SOFC در این صنعت پیدا نشده است تنها برنامه‌های موجود بررسی و پیگیری شود. اما این موضوع از جهتی مورد بحث خواهد بود که در حالی که بعضی کشورها در این صنعت به قطب تبدیل می‌شوند و بازارهای جهانی را در تسخیر خود خواهند گرفت، در حالی که کشور این بازار را از دست خواهد داد.
۳. ایجاد قرار داد با شرکت‌های نوپا در سراسر جهان و ایجاد تیم‌های مشترک
این پیشنهاد نیز با چالش جدی با توجه به تحریم بودن کشور رو به رو خواهد شد در نتیجه بهترین راه مجاب کردن شرکت‌های کوچک در حال توسعه است.
۴. تکیه بر توان دانشگاهی
ایجاد تیم‌هایی تحقیقاتی از دانشگاه‌های برتر کشور بر روی توسعه این تکنولوژی یکی دیگر از نظرات می‌باشد. اما این موضوع نیز چالش‌هایی در پیش خواهد داشت که مهم‌ترین موضوع میزان سرمایه برای مجاب کردن اساتید و زمان به نتیجه رسیدن تکنولوژی است.
۵. تکیه بر توان شرکت‌های داخلی
یکی از بهترین راه‌حل‌ها مجاب کردن شرکت‌ها خصوصی برای توسعه این تکنولوژی است. همان‌طور که در فصل ۵ نشان دادیم سیستم SOFC با استفاده از CHP توانایی IRR (نرخ بازگشت) حدود ۶۷٪ را دارد و با توجه به راندمان کلی حدود ۹۰٪ این سیستم‌ها در مقایسه با راندمان فعلی ۳۵-۵۷٪ نیروگاه‌های کشور، جذابیت این تکنولوژی را می‌توانند برای شرکت‌ها چندین برابر کند.

(۹) فصل

پیوست

۹-۱) پیوست ۱ (جزئیات هزینه و ساخت پیل سوختی توسط Battelle)

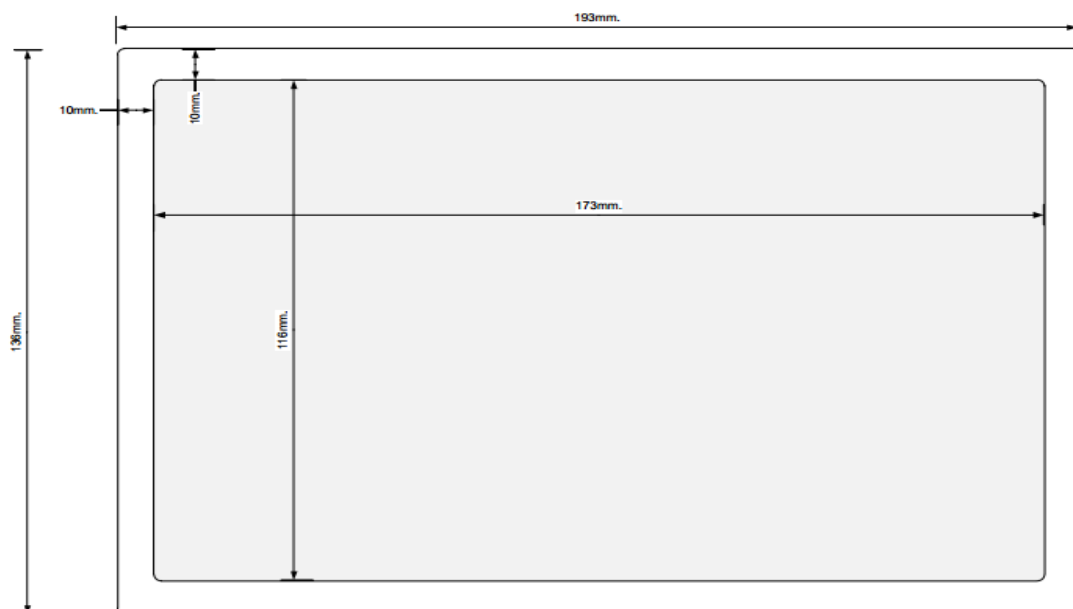
۹-۱-۱) اندازه‌ی اجزاء SOFC و مراحل تولید سلول سرامیک

اجزای سلولی سرامیکی برای هر دو استک ۱ و ۵ کیلووات فرض می‌شود که دارای ۲۰۱ سانتی متر مربع منطقه فعال باشد. با استفاده از نسبت طول به عرض ۱,۵، اندازه سلول فعال ۱۱۶ میلی متر در ۱۷۳ میلی متر تعیین شد. با استفاده از حاشیه ۱۰ میلی‌متر در هر طرف، اندازه کلی سلول به اندازه ۲۳۴ میلی متر در ۱۳۶ میلی‌متر تعیین شده است.

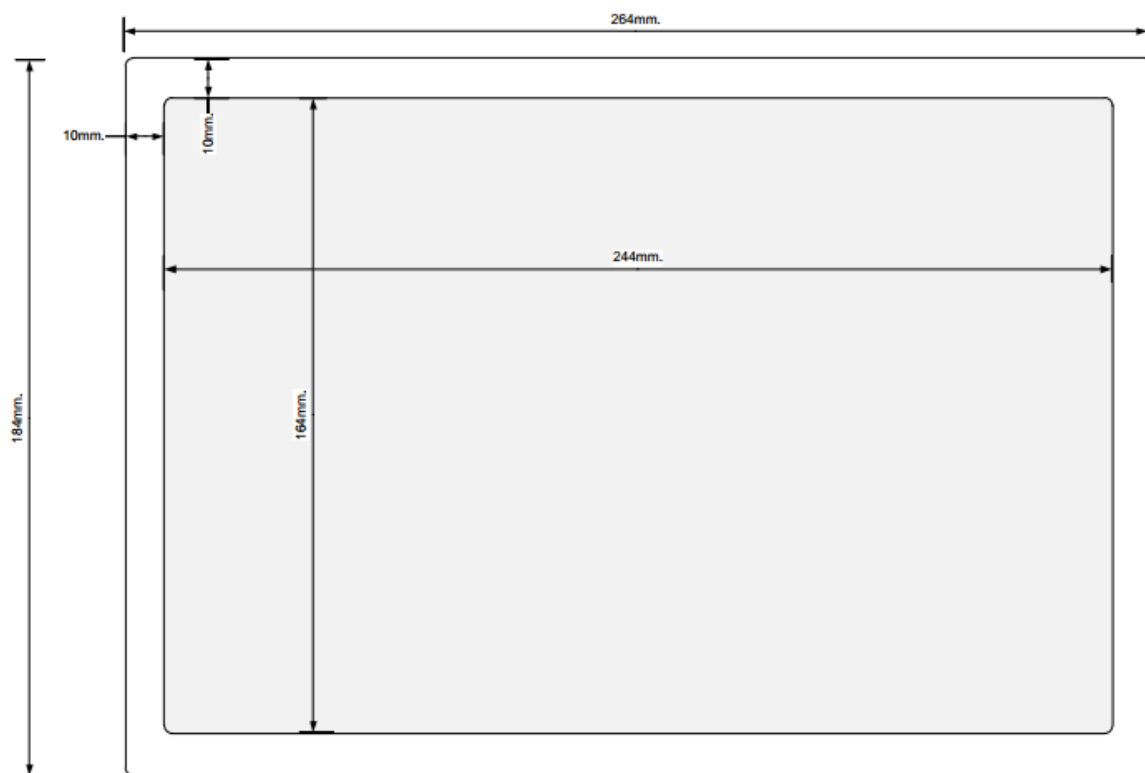
اجزای سلول سرامیکی برای هر دو استک ۱۰ و ۲۵ کیلووات فرض می‌شود که دارای ۴۰۰ سانتیمتر مربع منطقه‌ی فعال باشد. با استفاده از نسبت طول به عرض ۱,۵، اندازه سلول فعال به اندازه ۱۶۴ میلی متر در ۲۴۴ میلی متر تعیین شده است. با استفاده از حاشیه ۱۰ میلی‌متر در هر طرف، اندازه سلول کلی ۱۸۴ میلی‌متر در ۲۶۴ میلی‌متر تعیین شده است.

اجزای سلول سرامیکی برای استک ۳۰ کیلووات (در هر دو سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات استفاده می‌شود) فرض می‌شود که دارای ۴۱۴ سانتی‌متر مربع منطقه فعال باشند. با استفاده از نسبت طول ۱,۵، اندازه سلول فعال ۱۶۶ میلی‌متر در ۲۴۸ میلی‌متر تعیین شده است. با استفاده از حاشیه ۱۰ میلی‌متر در هر طرف، اندازه سلول کلی ۱۸۷ میلی‌متر در ۲۶۸ میلی‌متر تعیین شده است.

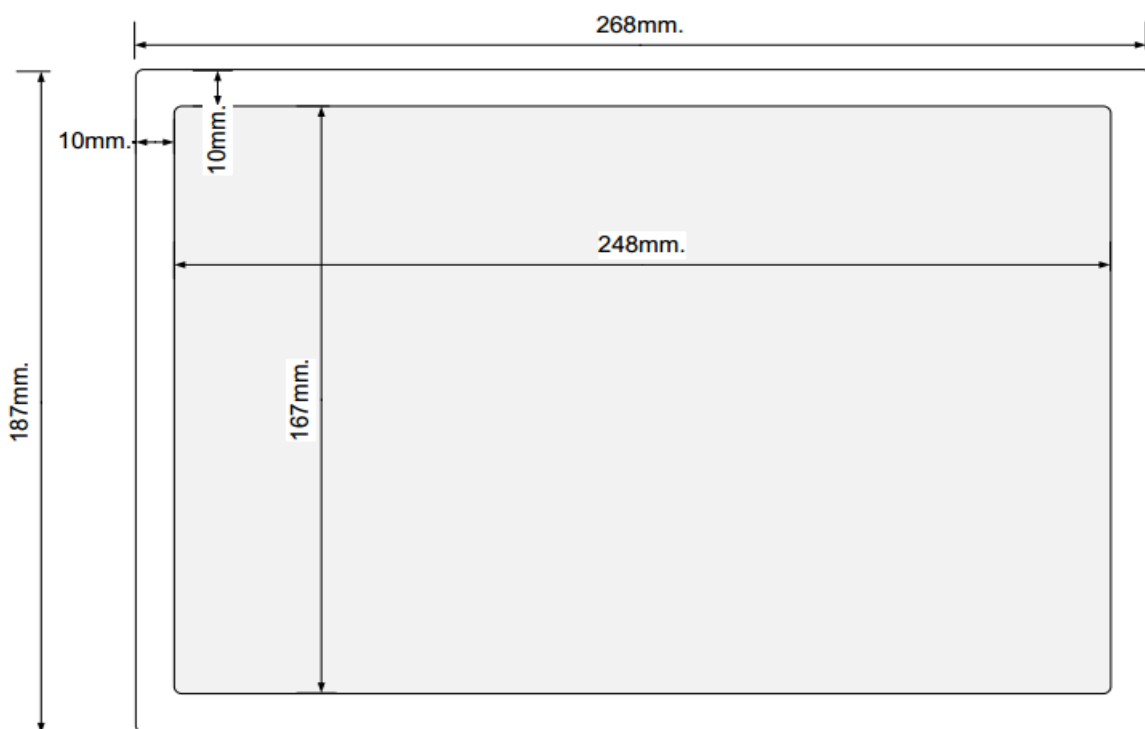
اندازه‌های سلول در شکل‌های ۱-۹ و ۲-۹ و ۳-۹ نشان داده شده است.



شکل ۱-۹ اندازه پیل SOFC دارای ۲۰۱ ناحیه‌ی فعال [45]



شکل ۹-۲ اندازه‌ی SOFC دارای ۴۰۰ ناحیه‌ی فعال [45]



شکل ۹-۳ اندازه‌ی SOFC دارای ۴۱۴ ناحیه‌ی فعال [46]

۹-۱-۲) سلول سرامیکی سیستم SOFC

سلول سرامیکی سیستم SOFC چند لایه ساخته شده است. تکیه‌گاه آندی به روش ریخته‌گری ساخته شده است و سینترینگ دو بار بر روی پیل انجام شده است. هزینه‌های سلولی سرامیکی در جدول ۱ (توان ۱ و ۵ کیلووات) و جدول ۲ (توان ۱۰ و ۲۵ کیلووات) و جدول ۳ (توان ۱۰ و ۲۵ کیلووات) نشان داده شده است.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$4.42	\$2.48	\$1.65	\$1.51	\$2.85	\$1.84	\$1.50	\$1.45
Labor	\$3.87	\$3.20	\$3.15	\$3.14	\$3.28	\$3.15	\$3.14	\$3.14
Machine	\$7.04	\$6.31	\$5.78	\$2.51	\$6.33	\$5.71	\$2.42	\$1.79
Scrap	\$0.47	\$0.36	\$0.32	\$0.21	\$0.38	\$0.32	\$0.21	\$0.19
Tooling	\$0.20	\$0.11	\$0.10	\$0.10	\$0.12	\$0.10	\$0.10	\$0.10
Part Total	\$15.99	\$12.46	\$10.99	\$7.47	\$12.95	\$11.13	\$7.37	\$6.67
# per Stack	21	21	21	21	107	107	107	107
Stack Total	\$335.89	\$261.64	\$230.74	\$156.82	\$1,385.69	\$1,190.83	\$788.96	\$714.13

جدول ۱ خلاصه هزینه‌ی سلول سرامیکی SOFC: سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$4.68	\$3.11	\$2.76	\$2.70	\$3.94	\$2.88	\$2.72	\$2.69
Labor	\$4.11	\$4.00	\$3.99	\$3.99	\$4.03	\$4.00	\$3.99	\$3.99
Machine	\$9.45	\$8.02	\$3.83	\$2.91	\$9.37	\$5.28	\$3.17	\$2.78
Scrap	\$0.55	\$0.46	\$0.32	\$0.29	\$0.53	\$0.37	\$0.30	\$0.29
Tooling	\$0.17	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14
Part Total	\$18.97	\$15.73	\$11.05	\$10.04	\$18.02	\$12.67	\$10.32	\$9.89
# per Stack	107	107	107	107	268	268	268	268
Stack Total	\$2,029.33	\$1,683.26	\$1,181.84	\$1,073.76	\$4,828.14	\$3,394.67	\$2,765.60	\$2,650.26

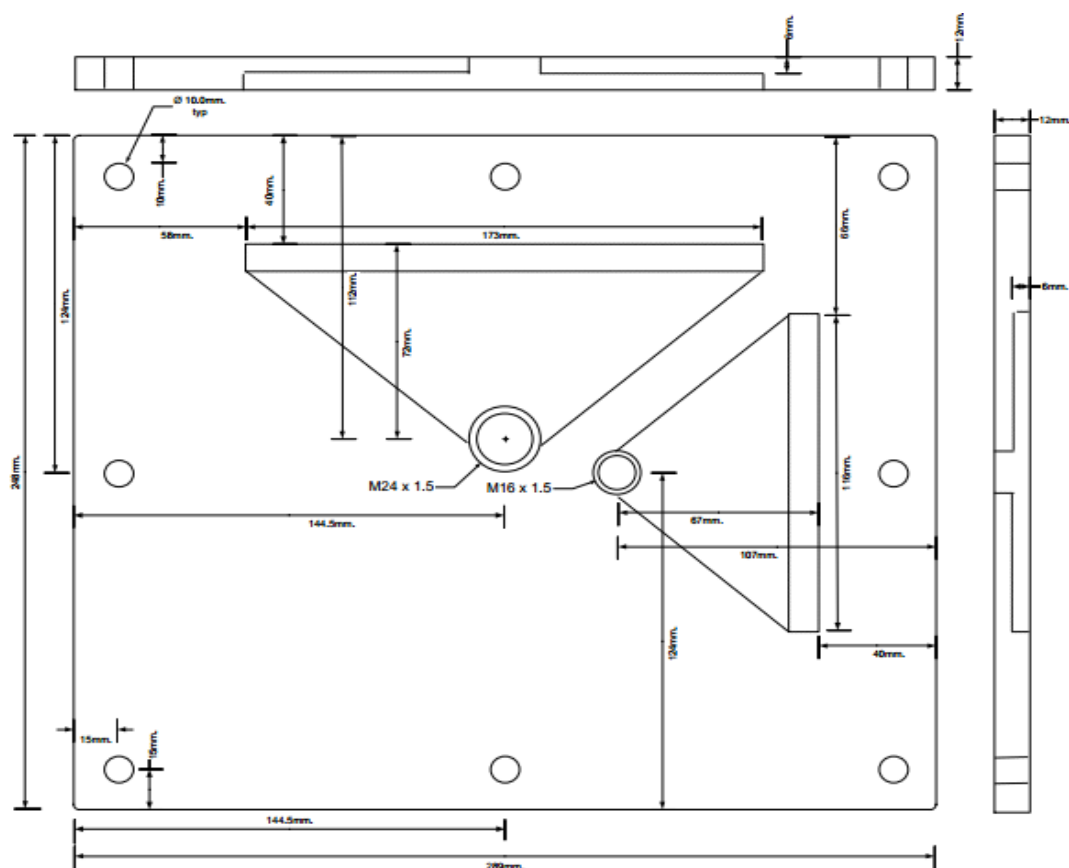
جدول ۲ خلاصه هزینه‌ی سلول سرامیکی SOFC: سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$5.36	\$5.11	\$5.04	\$5.03	\$5.24	\$5.06	\$5.03	\$5.02
Labor	\$3.87	\$3.85	\$3.85	\$3.85	\$3.86	\$3.85	\$3.85	\$3.85
Machine	\$8.43	\$3.92	\$2.76	\$2.63	\$5.43	\$3.04	\$2.65	\$2.62
Scrap	\$0.54	\$0.39	\$0.36	\$0.35	\$0.44	\$0.37	\$0.35	\$0.35
Tooling	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14
Part Total	\$18.33	\$13.42	\$12.15	\$12.01	\$15.11	\$12.47	\$12.03	\$11.98
# per Stack	259	259	259	259	259	259	259	259
Total Cost per Stack	\$4,748.70	\$3,475.98	\$3,147.06	\$3,110.03	\$3,912.28	\$3,228.67	\$3,115.22	\$3,103.48

جدول ۳ خلاصه هزینه‌ی سلول سرامیکی SOFC: سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

۳-۱-۹) صفحه‌های انتهایی^۱ سیستم SOFC

صفحه‌های انتهایی سیستم SOFC با استک پیل سوختی در امتداد طول صفحه هم‌تراز می‌شوند و با فاصله‌ی ۳۰ میلی‌متر در هر طرف به استک وصل می‌شوند تا بتوانند هشت میله میانی که استک را با هم فشار داده، نگه دارند. ورق انتهایی دارای دو سوراخ برای نصب اتصالات گاز آند و کاتد می‌باشد، همانطور که در شکل ۹-۴ (توان ۵۱ کیلووات) و شکل ۹-۵ (توان ۱۰ و ۲۵ کیلووات) و شکل ۹-۶ (توان ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات) نشان داده شده است. در جدول‌های ۴ تا ۶ هزینه‌های این پیل‌ها نشان داده شده است.

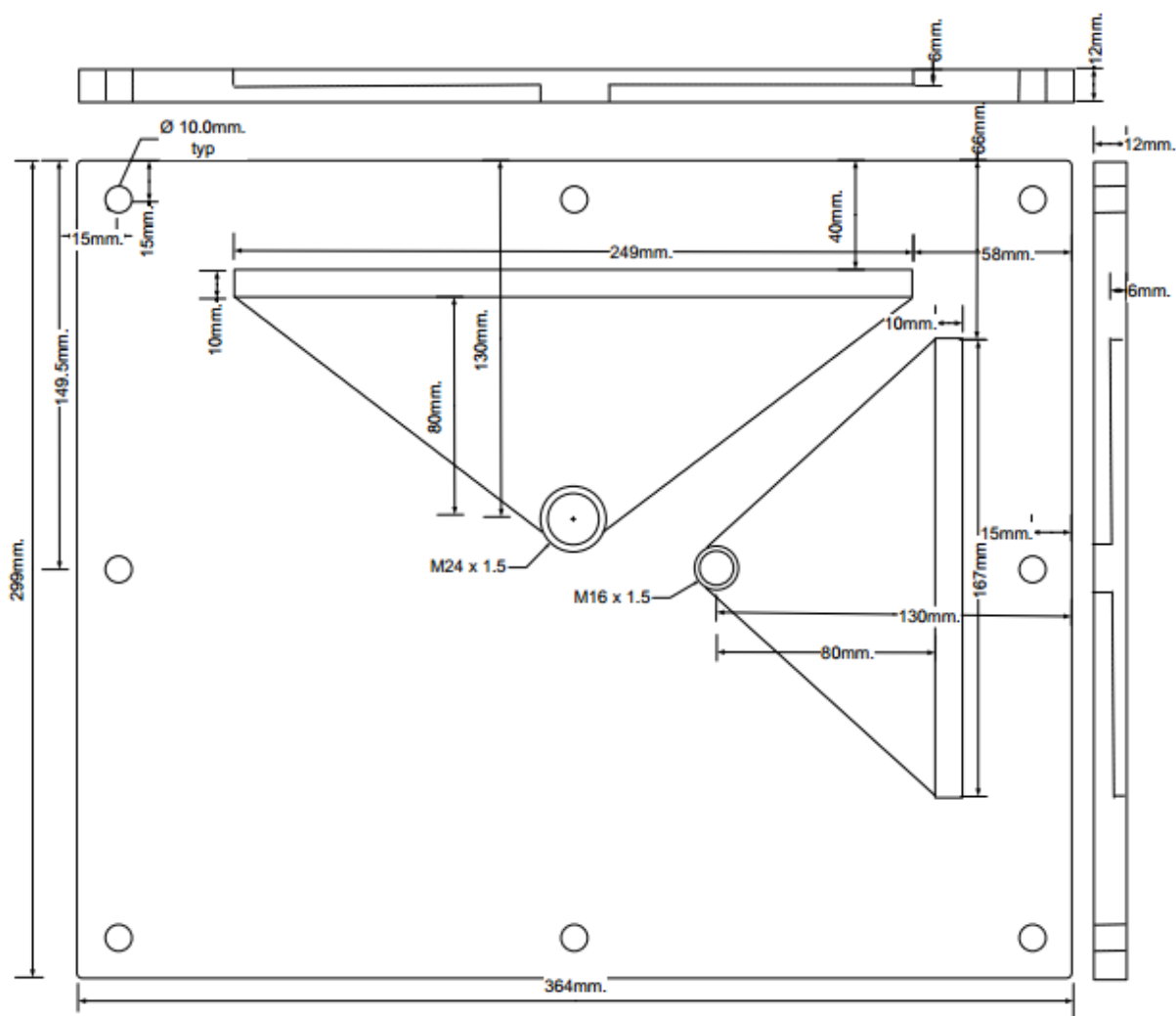


شکل ۹-۴ اندازه‌ی صفحه‌ی انتهایی سیستم SOFC دارای ۲۰۱ سانتی متر مربع ناحیه‌ی فعال [45]

^۱ End Plates

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$314.91	\$285.54	\$285.54	\$285.54	\$314.91	\$285.54	\$285.54	\$285.54
Labor	\$19.24	\$14.85	\$14.41	\$14.37	\$19.24	\$14.85	\$14.41	\$14.37
Machine	\$56.14	\$56.14	\$20.09	\$20.09	\$56.14	\$56.14	\$20.09	\$20.09
Scrap	\$1.96	\$1.79	\$1.61	\$1.61	\$1.96	\$1.79	\$1.61	\$1.61
Tooling	\$18.59	\$1.86	\$0.19	\$0.11	\$18.59	\$1.86	\$0.19	\$0.11
Part Total	\$410.84	\$360.17	\$321.83	\$321.71	\$410.84	\$360.17	\$321.83	\$321.71
# per Stack	2	2	2	2	2	2	2	2
Stack Total	\$821.67	\$720.34	\$643.65	\$643.43	\$821.67	\$720.34	\$643.65	\$643.43

جدول ۵ خلاصه هزینه‌ی صفحه‌ی انتهایی SOFC: سیستم‌های ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]



شکل ۹-۶ اندازه‌ی صفحه‌ی انتهایی سیستم SOFC دارای ۴۱۴ سانتی متر مربع ناحیه‌ی فعال [46]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$212.77	\$212.77	\$212.77	\$212.77	\$212.77	\$212.77	\$212.77	\$212.77
Labor	\$28.15	\$27.10	\$26.99	\$26.98	\$27.45	\$27.03	\$26.98	\$26.98
Machine	\$105.44	\$61.37	\$32.84	\$30.94	\$105.44	\$42.35	\$30.94	\$30.94
Scrap	\$1.74	\$1.51	\$1.37	\$1.36	\$1.74	\$1.42	\$1.36	\$1.36
Tooling	\$3.76	\$0.38	\$0.11	\$0.09	\$1.50	\$0.15	\$0.09	\$0.08
Part Total	\$351.87	\$303.13	\$274.09	\$272.15	\$348.90	\$283.72	\$272.15	\$272.14
# per Stack	2	2	2	2	2	2	2	2
Total Cost per Stack	\$703.74	\$606.26	\$548.18	\$544.29	\$697.81	\$567.44	\$544.30	\$544.28

جدول ۶ خلاصه هزینه‌ی صفحه‌ی انتهایی SOFC: سیستم‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

۹-۱-۴) سیستم‌های اتصال SOFC

اتصال‌دهنده‌ها از ورقه فولاد ضد زنگ فريتی^۱ دارای ضخامت ۳ میلی‌متر SS-441 ساخته شده‌اند. خلاصه هزینه‌ی اتصال در جدول ۷ تا ۹ ارائه شده است.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.91	\$0.66	\$0.52	\$0.45	\$0.71	\$0.56	\$0.45	\$0.41
Labor	\$0.41	\$0.34	\$0.34	\$0.34	\$0.35	\$0.34	\$0.34	\$0.34
Machine	\$1.60	\$1.53	\$1.52	\$0.67	\$1.53	\$1.52	\$0.64	\$0.34
Scrap	\$0.11	\$0.09	\$0.09	\$0.05	\$0.09	\$0.09	\$0.05	\$0.04
Tooling	\$3.55	\$0.36	\$0.11	\$0.10	\$0.70	\$0.14	\$0.10	\$0.09
Part Total	\$6.59	\$2.98	\$2.57	\$1.60	\$3.39	\$2.64	\$1.57	\$1.22
# per Stack	21	21	21	21	107	107	107	107
Stack Total	\$138.37	\$62.52	\$53.93	\$33.67	\$362.56	\$282.47	\$168.11	\$130.08

جدول ۷ خلاصه هزینه‌ی اتصال SOFC برای سیستم‌های ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

¹ ferritic stainless steel

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$1.11	\$0.87	\$0.71	\$0.68	\$1.00	\$0.80	\$0.68	\$0.68
Labor	\$0.46	\$0.44	\$0.43	\$0.43	\$0.44	\$0.43	\$0.43	\$0.43
Machine	\$2.22	\$2.19	\$1.01	\$0.40	\$2.20	\$1.76	\$0.55	\$0.37
Scrap	\$0.14	\$0.13	\$0.08	\$0.05	\$0.13	\$0.11	\$0.06	\$0.05
Tooling	\$0.91	\$0.18	\$0.13	\$0.12	\$0.36	\$0.14	\$0.12	\$0.12
Part Total	\$4.83	\$3.81	\$2.35	\$1.69	\$4.14	\$3.24	\$1.85	\$1.66
# per Stack	107	107	107	107	268	268	268	268
Stack Total	\$516.58	\$407.16	\$251.98	\$181.10	\$1,109.42	\$869.60	\$495.03	\$444.41

جدول ۸ خلاصه هزینه‌ی اتصال SOFC برای سیستم‌های ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.90	\$0.73	\$0.70	\$0.70	\$0.82	\$0.70	\$0.70	\$0.70
Labor	\$0.37	\$0.37	\$0.37	\$0.37	\$0.37	\$0.37	\$0.37	\$0.37
Machine	\$2.23	\$1.06	\$0.36	\$0.36	\$1.84	\$0.59	\$0.37	\$0.35
Scrap	\$0.13	\$0.08	\$0.05	\$0.05	\$0.11	\$0.06	\$0.05	\$0.05
Tooling	\$0.19	\$0.12	\$0.12	\$0.12	\$0.15	\$0.13	\$0.12	\$0.12
Part Total	\$3.81	\$2.36	\$1.60	\$1.60	\$3.29	\$1.84	\$1.61	\$1.59
# per Stack	259	259	259	259	259	259	259	259
Total Cost per Stack	\$987.20	\$610.15	\$413.44	\$413.34	\$852.26	\$476.71	\$417.52	\$410.81

جدول ۹ خلاصه هزینه‌ی اتصال SOFC برای سیستم‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

۵-۱-۹) قاب‌های SOFC

واحد تکرارشونده SOFC شامل سه فریم است:

- قاب آند از اتصال‌دهنده در سمت آند حمایت می‌کند و فضا برای آند و آند مش فراهم می‌کند.
 - Picture frame از تمام قسمت‌های الکترولیت و آب‌بندی شده (جوش یا شیشه‌ای) به قاب آند پشتیبانی می‌کند.
 - قاب کاتد از اتصال‌دهنده در سمت کاتد پشتیبانی می‌کند و فضا را برای مش کاتد فراهم می‌کند.
- فریم‌های آند، picture و کاتد از ورق فولاد ضد زنگ فرتی (SS-441) با ضخامت ۰.۳/۱ میلی‌متر، ۰.۲۵ میلی‌متر و ۰.۲۵ میلی‌متر (به ترتیب) تولید می‌شوند.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.92	\$0.72	\$0.72	\$0.72	\$0.72	\$0.72	\$0.72	\$0.72
Labor	\$0.12	\$0.02	\$0.02	\$0.01	\$0.03	\$0.02	\$0.01	\$0.01
Machine	\$0.11	\$0.03	\$0.03	\$0.02	\$0.04	\$0.03	\$0.02	\$0.01
Scrap	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$3.73	\$0.37	\$0.11	\$0.10	\$0.73	\$0.15	\$0.10	\$0.10
Part Total	\$4.88	\$1.15	\$0.88	\$0.87	\$1.53	\$0.91	\$0.87	\$0.85
# per Stack	21	21	21	21	107	107	107	107
Stack Total	\$102.47	\$24.24	\$18.41	\$18.22	\$163.84	\$97.67	\$92.62	\$90.94

جدول ۱۰ خلاصه هزینه‌ی قاب آند برای سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$1.16	\$1.16	\$1.16	\$1.16	\$1.16	\$1.16	\$1.16	\$1.16
Labor	\$0.04	\$0.02	\$0.02	\$0.02	\$0.03	\$0.02	\$0.02	\$0.02
Machine	\$0.05	\$0.04	\$0.04	\$0.01	\$0.04	\$0.04	\$0.04	\$0.02
Scrap	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01
Tooling	\$0.95	\$0.19	\$0.13	\$0.13	\$0.38	\$0.15	\$0.13	\$0.13
Part Total	\$2.22	\$1.42	\$1.36	\$1.33	\$1.62	\$1.38	\$1.36	\$1.33
# per Stack	107	107	107	107	268	268	268	268
Stack Total	\$237.03	\$151.93	\$145.46	\$141.89	\$434.35	\$369.66	\$363.19	\$357.09

جدول ۱۱ خلاصه هزینه‌ی قاب آند برای سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$1.18	\$1.18	\$1.18	\$1.18	\$1.18	\$1.18	\$1.18	\$1.18
Labor	\$0.02	\$0.02	\$0.02	\$0.02	\$0.02	\$0.02	\$0.02	\$0.02
Machine	\$0.04	\$0.04	\$0.01	\$0.01	\$0.04	\$0.04	\$0.01	\$0.01
Scrap	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.01
Tooling	\$0.20	\$0.13	\$0.13	\$0.13	\$0.16	\$0.13	\$0.13	\$0.13
Part Total	\$1.45	\$1.38	\$1.35	\$1.35	\$1.41	\$1.38	\$1.35	\$1.34
# per Stack	259	259	259	259	259	259	259	259
Total Cost per Stack	\$375.44	\$356.24	\$349.34	\$348.40	\$364.39	\$356.71	\$349.24	\$347.87

جدول ۱۲ خلاصه هزینه‌ی قاب آند برای سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.22	\$0.17	\$0.17	\$0.17	\$0.17	\$0.17	\$0.17	\$0.17
Labor	\$0.06	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.01
Machine	\$0.06	\$0.02	\$0.02	\$0.02	\$0.03	\$0.02	\$0.02	\$0.01
Scrap	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$4.41	\$0.44	\$0.13	\$0.12	\$0.87	\$0.17	\$0.12	\$0.12
Part Total	\$4.76	\$0.65	\$0.34	\$0.33	\$1.09	\$0.38	\$0.33	\$0.31
# per Stack	21	21	21	21	107	107	107	107
Stack Total	\$99.86	\$13.74	\$7.08	\$6.88	\$116.40	\$40.55	\$34.82	\$33.31

جدول ۱۳ خلاصه هزینه قاب Picture برای سیستم‌های ۱ و ۵ کیلووات [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28
Labor	\$0.03	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.02	\$0.02	\$0.01	\$0.01
Machine	\$0.04	\$0.03	\$0.02	\$0.01	\$0.03	\$0.02	\$0.02	\$0.01
Scrap	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$1.14	\$0.23	\$0.16	\$0.15	\$0.46	\$0.18	\$0.15	\$0.15
Part Total	\$1.50	\$0.55	\$0.48	\$0.46	\$0.79	\$0.50	\$0.48	\$0.46
# per Stack	107	107	107	107	268	268	268	268
Stack Total	\$160.26	\$59.14	\$51.47	\$48.75	\$211.94	\$135.23	\$127.56	\$123.27

جدول ۱۴ خلاصه هزینه قاب Picture برای سیستم‌های ۱۰ و ۲۵ کیلووات [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29
Labor	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.01
Machine	\$0.03	\$0.02	\$0.01	\$0.00	\$0.02	\$0.02	\$0.01	\$0.00
Scrap	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.24	\$0.16	\$0.16	\$0.16	\$0.19	\$0.16	\$0.16	\$0.16
Part Total	\$0.57	\$0.49	\$0.47	\$0.47	\$0.52	\$0.49	\$0.47	\$0.46
# per Stack	259	259	259	259	259	259	259	259
Total Cost per Stack	\$148.53	\$125.93	\$121.30	\$120.61	\$135.53	\$126.49	\$121.18	\$120.25

جدول ۱۵ خلاصه هزینه قاب Picture برای سیستم‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات [46]

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.22	\$0.17	\$0.17	\$0.17	\$0.17	\$0.17	\$0.17	\$0.17
Labor	\$0.06	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.01
Machine	\$0.06	\$0.02	\$0.02	\$0.02	\$0.03	\$0.02	\$0.02	\$0.01
Scrap	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$3.45	\$0.34	\$0.10	\$0.10	\$0.68	\$0.14	\$0.09	\$0.09
Part Total	\$3.79	\$0.56	\$0.31	\$0.30	\$0.90	\$0.34	\$0.30	\$0.29
# per Stack	21	21	21	21	107	107	107	107
Stack Total	\$79.64	\$11.70	\$6.46	\$6.30	\$96.11	\$36.42	\$31.90	\$30.51

جدول ۱۶ خلاصه هزینه قاب کاتد برای سیستم‌های ۱ و ۵ کیلووات [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.27	\$0.27	\$0.27	\$0.27	\$0.27	\$0.27	\$0.27	\$0.27
Labor	\$0.03	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.02	\$0.02	\$0.01	\$0.01
Machine	\$0.04	\$0.03	\$0.02	\$0.01	\$0.03	\$0.02	\$0.02	\$0.01
Scrap	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.87	\$0.17	\$0.12	\$0.12	\$0.35	\$0.14	\$0.12	\$0.12
Part Total	\$1.22	\$0.49	\$0.43	\$0.41	\$0.67	\$0.45	\$0.43	\$0.41
# per Stack	107	107	107	107	268	268	268	268
Stack Total	\$130.49	\$52.29	\$46.34	\$43.80	\$180.49	\$120.97	\$115.01	\$110.84

جدول ۱۷ خلاصه هزینه قاب کاتد برای سیستم‌های ۱۰ و ۲۵ کیلووات [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28	\$0.28
Labor	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.01	\$0.02	\$0.01	\$0.01	\$0.01
Machine	\$0.03	\$0.02	\$0.01	\$0.00	\$0.02	\$0.02	\$0.01	\$0.00
Scrap	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.18	\$0.12	\$0.12	\$0.12	\$0.15	\$0.12	\$0.12	\$0.12
Part Total	\$0.51	\$0.44	\$0.42	\$0.42	\$0.47	\$0.44	\$0.42	\$0.42
# per Stack	259	259	259	259	259	259	259	259
Total Cost per Stack	\$131.12	\$113.67	\$109.04	\$108.38	\$121.07	\$114.08	\$108.94	\$108.02

جدول ۱۸ خلاصه هزینه قاب کاتد برای سیستم‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات [46]

۹-۱-۶) جوش لیزری SOFC

برای به حداقل رساندن استفاده از سرامیک شیشه‌ای و کاهش هر گونه احتمال نشت، برخی از مجموعه‌های اجزای فلزی قبل از مونتاژ جوش لیزری داده می‌شوند. خلاصه هزینه‌های اتصال در جدول ۱۹ تا ۲۱ ارائه شده است.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Labor	\$0.25	\$0.24	\$0.23	\$0.23	\$0.24	\$0.23	\$0.23	\$0.23
Machine	\$67.02	\$6.56	\$0.52	\$0.11	\$13.03	\$1.16	\$0.11	\$0.11
Scrap	\$0.34	\$0.03	\$0.00	\$0.00	\$0.07	\$0.01	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$67.61	\$6.83	\$0.76	\$0.35	\$13.33	\$1.41	\$0.34	\$0.34
# per Stack	21	21	21	21	107	107	107	107
Stack Total	\$1,419.76	\$143.49	\$15.86	\$7.35	\$1,426.63	\$150.36	\$36.91	\$36.51

جدول ۱۹ خلاصه هزینه‌های جوش لیزری برای سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Labor	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29	\$0.29
Machine	\$13.00	\$1.13	\$0.13	\$0.13	\$5.07	\$0.34	\$0.13	\$0.13
Scrap	\$0.07	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.03	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$13.35	\$1.42	\$0.42	\$0.42	\$5.39	\$0.63	\$0.42	\$0.42
# per Stack	107	107	107	107	268	268	268	268
Stack Total	\$1,428.55	\$152.28	\$44.71	\$44.70	\$1,444.31	\$168.04	\$111.97	\$111.97

جدول ۲۰ خلاصه هزینه‌های جوش لیزری برای سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Labor	\$0.19	\$0.19	\$0.19	\$0.19	\$0.19	\$0.19	\$0.19	\$0.19
Machine	\$0.95	\$0.13	\$0.13	\$0.13	\$0.27	\$0.13	\$0.13	\$0.13
Scrap	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$1.15	\$0.32	\$0.32	\$0.32	\$0.46	\$0.32	\$0.32	\$0.32
# per Stack	259	259	259	259	259	259	259	259
Total Cost per Stack	\$298.00	\$83.75	\$83.75	\$83.75	\$119.20	\$83.75	\$83.75	\$83.75

جدول ۲۱ خلاصه هزینه‌های جوش لیزری برای سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [45]

۷-۱-۹) آب‌بندی سرامیک شیشه‌ای سیستم SOFC

آب‌بندی شیشه‌ای سرامیکی بین پیل، picture frame و اتصال‌هنده قبل از مونتاژ بر روی استک انجام می‌شود. اجزای اصلی لانتانیم اکسید و شیشه بوروسیلیکات هستند. خلاصه هزینه آب‌بندی در جدول ۲۲ تا ۲۴ ارائه شده است.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$1.12	\$0.79	\$0.55	\$0.49	\$0.87	\$0.61	\$0.49	\$0.49
Labor	\$0.59	\$0.54	\$0.54	\$0.54	\$0.55	\$0.54	\$0.54	\$0.54
Machine	\$161.77	\$16.01	\$1.43	\$0.13	\$31.59	\$2.99	\$0.13	\$0.06
Scrap	\$5.06	\$0.54	\$0.08	\$0.04	\$1.02	\$0.13	\$0.04	\$0.03
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$168.54	\$17.87	\$2.60	\$1.19	\$34.03	\$4.27	\$1.19	\$1.12
# per Stack	21	21	21	21	107	107	107	107
Stack Total	\$3,539.25	\$375.33	\$54.53	\$25.04	\$3,641.74	\$456.50	\$126.92	\$119.86

جدول ۲۲ خلاصه هزینه آب بندی سرامیک-شیشه‌ای در SOFC : سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$1.09	\$0.77	\$0.63	\$0.63	\$0.95	\$0.67	\$0.63	\$0.63
Labor	\$0.69	\$0.68	\$0.68	\$0.68	\$0.68	\$0.68	\$0.68	\$0.68
Machine	\$31.55	\$2.94	\$0.08	\$0.08	\$12.45	\$1.03	\$0.14	\$0.04
Scrap	\$1.03	\$0.14	\$0.04	\$0.04	\$0.44	\$0.07	\$0.04	\$0.04
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$34.36	\$4.52	\$1.43	\$1.43	\$14.52	\$2.45	\$1.50	\$1.39
# per Stack	107	107	107	107	268	268	268	268
Stack Total	\$3,676.15	\$483.44	\$153.08	\$153.08	\$3,890.08	\$655.27	\$400.80	\$372.73

جدول ۲۳ خلاصه هزینه آب بندی سرامیک-شیشه‌ای در SOFC : سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.78	\$0.64	\$0.64	\$0.64	\$0.68	\$0.64	\$0.64	\$0.64
Labor	\$0.41	\$0.41	\$0.41	\$0.41	\$0.41	\$0.41	\$0.41	\$0.41
Machine	\$2.07	\$0.10	\$0.10	\$0.09	\$0.10	\$0.10	\$0.09	\$0.09
Scrap	\$0.10	\$0.04	\$0.04	\$0.04	\$0.04	\$0.04	\$0.04	\$0.04
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$3.36	\$1.18	\$1.18	\$1.17	\$1.22	\$1.18	\$1.17	\$1.17
# per Stack	259	259	259	259	259	259	259	259
Total Cost per Stack	\$869.39	\$306.61	\$306.61	\$303.10	\$315.90	\$306.61	\$303.10	\$303.10

جدول ۲۴ خلاصه هزینه آب بندی سرامیک-شیشه‌ای در SOFC : سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

SOFC Mesh (۹-۱-۸)

هر سلول دارای یک آند و کاتد مش است که هر کدام به عنوان یک کانال الکتریکی بین الکترودها و اتصالات رفتار می‌کنند، در حالی که اجازه می‌دهد فضای کافی برای عبور جریان گاز از سطح سلول ایجاد شود. آن‌ها از فولاد ضد زنگ ۰,۰۸ میلی متر که به ارتفاع مناسب، ۰,۵ میلی متر برای آند و ۰,۷۵ میلی متر برای کاتد

ساخته می‌شوند. خلاصه‌های هزینه مش در جدول ۲۵ تا ۲۷ (مش آند) و جدول ۲۸-۳۰ (مش کاند) ارائه شده است.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$1.30	\$0.91	\$0.64	\$0.50	\$1.01	\$0.71	\$0.50	\$0.40
Labor	\$0.10	\$0.09	\$0.09	\$0.09	\$0.09	\$0.09	\$0.09	\$0.09
Machine	\$0.10	\$0.10	\$0.10	\$0.07	\$0.10	\$0.10	\$0.06	\$0.04
Scrap	\$0.01	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$1.51	\$1.12	\$0.84	\$0.67	\$1.22	\$0.91	\$0.66	\$0.54
# per Stack	21	21	21	21	107	107	107	107
Stack Total	\$31.76	\$23.43	\$17.70	\$13.99	\$130.11	\$97.69	\$70.92	\$57.26

جدول ۲۵ خلاصه‌های هزینه مش آند: سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$1.30	\$0.92	\$0.65	\$0.57	\$1.13	\$0.80	\$0.57	\$0.57
Labor	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11
Machine	\$0.12	\$0.12	\$0.06	\$0.04	\$0.12	\$0.12	\$0.04	\$0.03
Scrap	\$0.01	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.01	\$0.01	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$1.54	\$1.15	\$0.81	\$0.71	\$1.36	\$1.03	\$0.71	\$0.70
# per Stack	107	107	107	107	268	268	268	268
Stack Total	\$164.27	\$122.71	\$87.06	\$76.30	\$365.38	\$275.12	\$191.05	\$188.67

جدول ۲۶ خلاصه‌های هزینه مش آند: سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.93	\$0.66	\$0.57	\$0.57	\$0.81	\$0.57	\$0.57	\$0.57
Labor	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11
Machine	\$0.12	\$0.06	\$0.03	\$0.03	\$0.12	\$0.04	\$0.03	\$0.03
Scrap	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$1.16	\$0.83	\$0.71	\$0.71	\$1.04	\$0.72	\$0.71	\$0.71
# per Stack	259	259	259	259	259	259	259	259
Total Cost per Stack	\$300.59	\$214.34	\$183.38	\$183.38	\$269.07	\$186.37	\$183.97	\$183.26

جدول ۲۷ خلاصه‌های هزینه مش آند: سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$1.38	\$0.97	\$0.68	\$0.54	\$1.08	\$0.76	\$0.53	\$0.42
Labor	\$0.11	\$0.09	\$0.09	\$0.09	\$0.10	\$0.09	\$0.09	\$0.09
Machine	\$0.10	\$0.10	\$0.10	\$0.07	\$0.10	\$0.10	\$0.07	\$0.04
Scrap	\$0.01	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$1.60	\$1.18	\$0.89	\$0.70	\$1.28	\$0.96	\$0.70	\$0.56
# per Stack	21	21	21	21	107	107	107	107
Stack Total	\$33.56	\$24.72	\$18.64	\$14.73	\$137.37	\$102.93	\$74.65	\$60.24

جدول ۲۸ خلاصه‌های هزینه مش کاتد: سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$1.36	\$0.96	\$0.68	\$0.59	\$1.18	\$0.83	\$0.59	\$0.59
Labor	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11
Machine	\$0.12	\$0.12	\$0.06	\$0.04	\$0.12	\$0.12	\$0.04	\$0.03
Scrap	\$0.01	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.01	\$0.01	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$1.60	\$1.19	\$0.85	\$0.74	\$1.42	\$1.07	\$0.74	\$0.73
# per Stack	107	107	107	107	268	268	268	268
Stack Total	\$171.06	\$127.61	\$90.53	\$79.34	\$380.31	\$285.96	\$198.68	\$196.26

جدول ۲۹ خلاصه‌های هزینه مش کاتد: سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$0.94	\$0.67	\$0.58	\$0.58	\$0.82	\$0.58	\$0.58	\$0.58
Labor	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11
Machine	\$0.12	\$0.06	\$0.03	\$0.03	\$0.12	\$0.04	\$0.03	\$0.03
Scrap	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.01	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$1.18	\$0.84	\$0.72	\$0.72	\$1.05	\$0.73	\$0.72	\$0.72
# per Stack	259	259	259	259	259	259	259	259
Total Cost per Stack	\$304.43	\$217.06	\$185.73	\$185.73	\$272.44	\$188.74	\$186.33	\$185.61

جدول ۳۰ خلاصه‌های هزینه مش کاتد: سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

۹-۱-۹) مونتاژ استک SOFC

میله‌ها tie برای تکمیل مونتاژ استک نصب می‌شود. هزینه‌های میله‌های^۱ tie با توجه به ارتفاع استک برای هر استک بین ۱,۷۶ تا ۱۳,۲۰ دلار برآورد می‌شود و هزینه‌ی سایر سخت‌افزارهای مونتاژ مانند واشر درج‌ها و مهره به ازای هر استک ۲۱۵,۶۷ دلار تخمین زده می‌شود. زمان مونتاژ استک با استفاده از نرم افزار DFMA تخمین زده می‌شود و بسته به تعداد سلول‌ها از ۰,۳۰ تا ۲,۳۲ ساعت متغیر است. پس از اعمال تجزیه و تحلیل منحنی یادگیری^۲ به زمان مونتاژ و ضرب با نرخ کار استاندارد \$ ۴۵,۰۰ / ساعت، متوسط هزینه‌های مونتاژ استک محاسبه شده و در جدول ۳۱ تا ۳۳ خلاصه شده است.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Materials	\$218.65	\$204.44	\$191.18	\$182.42	\$222.53	\$208.02	\$194.53	\$185.64
Labor	\$25.33	\$20.23	\$19.72	\$19.68	\$93.28	\$74.50	\$72.62	\$72.46
Total Assembly Cost	\$243.98	\$224.67	\$210.90	\$202.10	\$315.81	\$282.52	\$267.16	\$258.09

جدول ۳۱ هزینه‌های مونتاژ استک در SOFC: سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Materials	\$220.95	\$206.61	\$193.20	\$184.35	\$228.87	\$214.02	\$200.12	\$190.95
Labor	\$111.43	\$89.00	\$86.75	\$86.56	\$265.57	\$212.11	\$206.77	\$206.29
Total Assembly Cost	\$332.38	\$295.61	\$279.95	\$270.90	\$494.44	\$426.13	\$406.89	\$397.24

جدول ۳۲ هزینه‌های مونتاژ استک در SOFC: سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$206.93	\$193.50	\$181.00	\$172.75	\$201.46	\$188.42	\$176.25	\$168.22
Labor	\$200.31	\$188.20	\$186.99	\$186.88	\$192.23	\$187.39	\$186.91	\$186.86
Total Cost per Stack	\$407.24	\$381.70	\$367.98	\$359.63	\$393.70	\$375.81	\$363.16	\$355.08

جدول ۳۳ هزینه‌های مونتاژ استک در SOFC: سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

¹ Rod

² learning curve analysis

۱۰-۱-۹) لحیم کاری استک SOFC

پس از مونتاژ استک برای بهبود آب بندی سرامیک شیشه لحیم کاری می شود. نرخ ضایعات اجزاء پس از لحیم کاری ۵,۰٪ می باشد. خلاصه هزینه ی لحیم کاری استک در جدول ۳۴ تا ۳۶ ارائه شده است.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$4.43	\$2.11	\$1.02	\$0.90	\$13.36	\$6.36	\$4.57	\$4.52
Labor	\$1.39	\$0.92	\$0.87	\$0.87	\$2.65	\$2.17	\$2.12	\$2.12
Machine	\$6.24	\$6.24	\$6.24	\$6.24	\$15.85	\$15.85	\$15.85	\$6.46
Scrap	\$0.37	\$0.29	\$0.25	\$0.25	\$0.98	\$0.75	\$0.70	\$0.40
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$12.44	\$9.56	\$8.38	\$8.26	\$32.83	\$25.13	\$23.23	\$13.50

جدول ۳۴ خلاصه هزینه ی لحیم کاری استک در SOFC: سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$21.43	\$10.35	\$9.03	\$9.03	\$39.95	\$24.00	\$22.62	\$22.62
Labor	\$3.48	\$3.01	\$2.96	\$2.96	\$6.92	\$6.45	\$6.40	\$6.40
Machine	\$22.18	\$22.18	\$22.18	\$14.15	\$48.35	\$48.35	\$36.29	\$19.28
Scrap	\$1.46	\$1.10	\$1.06	\$0.81	\$2.94	\$2.44	\$2.02	\$1.49
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$48.56	\$36.64	\$35.23	\$26.94	\$98.17	\$81.23	\$67.33	\$49.78

جدول ۳۵ خلاصه هزینه ی لحیم کاری استک در SOFC: سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$25.92	\$22.62	\$22.62	\$22.62	\$24.00	\$22.62	\$22.62	\$22.62
Labor	\$6.37	\$6.25	\$6.24	\$6.24	\$6.29	\$6.24	\$6.24	\$6.24
Machine	\$47.14	\$47.14	\$25.81	\$19.43	\$47.14	\$36.45	\$19.43	\$19.43
Scrap	\$2.46	\$2.35	\$1.69	\$1.49	\$2.39	\$2.02	\$1.49	\$1.49
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$81.88	\$78.37	\$56.37	\$49.79	\$79.83	\$67.33	\$49.79	\$49.79
# per Stack	1	1	1	1	1	1	1	1
Total Cost per Stack	\$81.88	\$78.37	\$56.37	\$49.79	\$79.83	\$67.33	\$49.79	\$49.79

جدول ۳۶ خلاصه هزینه ی لحیم کاری استک در SOFC: سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

۹-۱-۱۱) تست و بهبود استک SOFC

پس از مونتاژ، استک برای ارزیابی تناسب آن برای نصب در یک سیستم در یک تست، تحت یک چرخه آزمایش ۶ ساعته قرار می گیرد. این چرخه شامل گرم کردن ۲ ساعته، ۲ ساعت full power و ۲ ساعت خنک کردن می باشد. نرخ تسلیم تست ۵,۰٪ می باشد. از آنجایی که استک لحیم کاری شده قابل جدا شدن نیست، در نتیجه استک تسلیم شده به عنوان قراضه^۱ در نظر گرفته می شود و هزینه های نسبتاً زیاد مرتبط با ضایعات به این دلیل می باشد. خلاصه آزمایش و بهبود استک در جدول ۳۷ تا ۳۹ ارائه شده است.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$42.35	\$20.18	\$9.64	\$6.45	\$127.75	\$60.87	\$32.73	\$31.34
Labor	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76
Machine	\$1,207.66	\$86.70	\$25.87	\$25.87	\$1,207.66	\$86.70	\$25.87	\$25.87
Scrap	\$424.13	\$102.39	\$67.99	\$59.15	\$521.89	\$188.11	\$125.71	\$115.78
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$1,831.90	\$367.03	\$261.28	\$249.24	\$2,015.06	\$493.45	\$342.08	\$330.76

جدول ۳۷ خلاصه هزینه‌ی آزمایش و بهبود استک SOFC : سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$204.55	\$97.80	\$62.67	\$62.67	\$381.23	\$193.69	\$156.97	\$156.97
Labor	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76
Machine	\$1,207.66	\$86.70	\$25.87	\$25.87	\$1,207.66	\$86.70	\$25.87	\$25.87
Scrap	\$594.10	\$244.01	\$171.53	\$159.56	\$842.52	\$418.03	\$327.86	\$315.19
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$2,164.08	\$586.27	\$417.84	\$405.87	\$2,589.17	\$856.18	\$668.47	\$655.80

جدول ۳۸ خلاصه هزینه‌ی آزمایش و بهبود استک SOFC : سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

¹ scrap

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$244.87	\$157.01	\$157.01	\$157.01	\$193.72	\$157.01	\$157.01	\$157.01
Labor	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76	\$157.76
Machine	\$273.53	\$25.87	\$25.87	\$25.87	\$86.70	\$25.87	\$25.87	\$25.87
Scrap	\$528.02	\$363.72	\$326.99	\$323.74	\$419.56	\$337.86	\$324.59	\$322.94
Tooling	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Part Total	\$1,204.18	\$704.37	\$667.64	\$664.39	\$857.75	\$678.51	\$665.24	\$663.59
# per Stack	1	1	1	1	1	1	1	1
Total Cost per Stack	\$1,204.18	\$704.37	\$667.64	\$664.39	\$857.75	\$678.51	\$665.24	\$663.59

جدول ۳۹ خلاصه هزینه‌ی آزمایش و بهبود استک SOFC : سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

۲-۹) هزینه های ساخت استک

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Ceramic Cells	\$335.89	\$261.64	\$230.74	\$156.82	\$1,385.69	\$1,190.83	\$788.96	\$714.13
Interconnects	\$138.37	\$62.52	\$53.93	\$33.67	\$362.56	\$282.47	\$168.11	\$130.08
Anode Frame	\$102.47	\$24.24	\$18.41	\$18.22	\$163.84	\$97.67	\$92.62	\$90.94
Anode Mesh	\$31.76	\$23.43	\$17.70	\$13.99	\$130.11	\$97.69	\$70.92	\$57.26
Cathode Frame	\$79.64	\$11.70	\$6.46	\$6.30	\$96.11	\$36.42	\$31.90	\$30.51
Cathode Mesh	\$33.56	\$24.72	\$18.64	\$14.73	\$137.37	\$102.93	\$74.65	\$60.24
Picture Frame	\$99.86	\$13.74	\$7.08	\$6.88	\$116.40	\$40.55	\$34.82	\$33.31
Laser Weld	\$1,419.76	\$143.49	\$15.86	\$7.35	\$1,426.63	\$150.36	\$36.91	\$36.51
Glass Ceramic Sealing	\$3,539.25	\$375.33	\$54.53	\$25.04	\$3,641.74	\$456.50	\$126.92	\$119.86
End Plates	\$613.64	\$505.69	\$455.96	\$440.45	\$613.64	\$505.69	\$455.96	\$440.45
Assembly hardware	\$218.65	\$204.44	\$191.18	\$182.42	\$222.53	\$208.02	\$194.53	\$185.64
Assembly labor	\$25.33	\$20.23	\$19.72	\$19.68	\$93.28	\$74.50	\$72.62	\$72.46
Stack Brazing	\$12.44	\$9.56	\$8.38	\$8.26	\$32.83	\$25.13	\$23.23	\$13.50
Test and conditioning	\$1,831.90	\$367.03	\$261.28	\$249.24	\$2,015.06	\$493.45	\$342.08	\$330.76
Total Cost per Stack	\$8,482.51	\$2,047.76	\$1,359.87	\$1,183.04	\$10,437.79	\$3,762.22	\$2,514.24	\$2,315.64
Cost per kW _{net}	\$8,482.51	\$2,047.76	\$1,359.87	\$1,183.04	\$2,087.56	\$752.44	\$502.85	\$463.13

جدول ۴۰ خلاصه هزینه‌های اجزای استک SOFC : توان ۱ و ۵ کیلووات [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Ceramic Cells	\$2,029.33	\$1,683.26	\$1,181.84	\$1,073.76	\$4,828.14	\$3,394.67	\$2,765.60	\$2,650.26
Interconnects	\$516.58	\$407.16	\$251.98	\$181.10	\$1,109.42	\$869.60	\$495.03	\$444.41
Anode Frame	\$237.03	\$151.93	\$145.46	\$141.89	\$434.35	\$369.66	\$363.19	\$357.09
Anode Mesh	\$164.27	\$122.71	\$87.06	\$76.30	\$365.38	\$275.12	\$191.05	\$188.67
Cathode Frame	\$130.49	\$52.29	\$46.34	\$43.80	\$180.49	\$120.97	\$115.01	\$110.84
Cathode Mesh	\$171.06	\$127.61	\$90.53	\$79.34	\$380.31	\$285.96	\$198.68	\$196.26
Picture Frame	\$160.26	\$59.14	\$51.47	\$48.75	\$211.94	\$135.23	\$127.56	\$123.27
Laser Weld	\$1,428.55	\$152.28	\$44.71	\$44.70	\$1,444.31	\$168.04	\$111.97	\$111.97
Glass Ceramic Sealing	\$3,676.15	\$483.44	\$153.08	\$153.08	\$3,890.08	\$655.27	\$400.80	\$372.73
End Plates	\$821.67	\$720.34	\$643.65	\$643.43	\$821.67	\$720.34	\$643.65	\$643.43
Assembly Hardware	\$220.95	\$206.61	\$193.20	\$184.35	\$228.87	\$214.02	\$200.12	\$190.95
Assembly Labor	\$111.43	\$89.00	\$86.75	\$86.56	\$265.57	\$212.11	\$206.77	\$206.29
Stack Brazing	\$48.56	\$36.64	\$35.23	\$26.94	\$98.17	\$81.23	\$67.33	\$49.78
Test and Conditioning	\$2,164.08	\$586.27	\$417.84	\$405.87	\$2,589.17	\$856.18	\$668.47	\$655.80
Total Cost	\$11,880.41	\$4,878.69	\$3,429.14	\$3,189.87	\$16,847.88	\$8,358.40	\$6,555.23	\$6,301.76
Cost per kW _{net}	\$1,188.04	\$487.87	\$342.91	\$318.99	\$673.92	\$334.34	\$262.21	\$252.07

جدول ۴۱ خلاصه هزینه‌های اجزای استک SOFC: توان ۱۰ و ۲۵ کیلووات [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Ceramic Cells	\$4,748.70	\$3,475.98	\$3,147.06	\$3,110.03	\$3,912.28	\$3,228.67	\$3,115.22	\$3,103.48
Interconnects	\$987.20	\$610.15	\$413.44	\$413.34	\$852.26	\$476.71	\$417.52	\$410.81
Anode Frame	\$375.44	\$356.24	\$349.34	\$348.40	\$364.39	\$356.71	\$349.24	\$347.87
Anode Mesh	\$300.59	\$214.34	\$183.38	\$183.38	\$269.07	\$186.37	\$183.97	\$183.26
Cathode Frame	\$131.12	\$113.67	\$109.04	\$108.38	\$121.07	\$114.08	\$108.94	\$108.02
Cathode Mesh	\$304.43	\$217.06	\$185.73	\$185.73	\$272.44	\$188.74	\$186.33	\$185.61
Picture Frame	\$148.53	\$125.93	\$121.30	\$120.61	\$135.53	\$126.49	\$121.18	\$120.25
Laser Weld	\$298.00	\$83.75	\$83.75	\$83.75	\$119.20	\$83.75	\$83.75	\$83.75
Glass Ceramic Sealing	\$869.39	\$306.61	\$306.61	\$303.10	\$315.90	\$306.61	\$303.10	\$303.10
End Plates	\$703.74	\$606.26	\$548.18	\$544.29	\$697.81	\$567.44	\$544.30	\$544.28
Assembly Hardware	\$206.93	\$193.50	\$181.00	\$172.75	\$201.46	\$188.42	\$176.25	\$168.22
Assembly Labor	\$200.31	\$188.20	\$186.99	\$186.88	\$192.23	\$187.39	\$186.91	\$186.86
Stack Brazing	\$81.88	\$78.37	\$56.37	\$49.79	\$79.83	\$67.33	\$49.79	\$49.79
Test and Conditioning	\$1,204.18	\$704.37	\$667.64	\$664.39	\$857.75	\$678.51	\$665.24	\$663.59
Total Cost per Stack	\$10,560.45	\$7,274.43	\$6,539.82	\$6,474.81	\$8,391.23	\$6,757.23	\$6,491.73	\$6,458.88

جدول ۴۲ خلاصه هزینه‌های اجزای استک SOFC: توان ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات [46]

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$933.32	\$752.97	\$691.21	\$667.24	\$1,622.95	\$1,250.63	\$1,099.37	\$1,056.43
Labor	\$334.83	\$299.26	\$296.08	\$295.80	\$787.93	\$739.37	\$734.80	\$734.41
Machine	\$6,301.21	\$829.64	\$278.58	\$139.62	\$6,963.43	\$1,441.83	\$461.54	\$322.36
Scrap	\$554.40	\$128.20	\$82.11	\$69.26	\$696.14	\$252.82	\$163.45	\$149.41
Tooling	\$358.75	\$37.70	\$11.91	\$11.12	\$367.35	\$77.56	\$55.08	\$53.03
Part Total	\$8,482.51	\$2,047.76	\$1,359.87	\$1,183.04	\$10,437.79	\$3,762.22	\$2,514.24	\$2,315.64

جدول ۴۳ خلاصه هزینه‌های ساخت استک SOFC : توان ۱ و ۵ کیلووات [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$2,280.83	\$1,777.87	\$1,599.36	\$1,564.18	\$3,937.28	\$3,064.09	\$2,800.17	\$2,784.63
Labor	\$940.18	\$886.73	\$881.74	\$881.32	\$2,006.39	\$1,924.09	\$1,915.92	\$1,915.19
Machine	\$7,396.43	\$1,783.58	\$649.70	\$466.49	\$9,257.67	\$2,586.06	\$1,214.10	\$997.82
Scrap	\$795.32	\$330.31	\$226.41	\$208.54	\$1,158.65	\$579.28	\$448.36	\$429.19
Tooling	\$469.32	\$101.68	\$73.34	\$70.71	\$490.37	\$207.02	\$178.73	\$176.92
Part Total	\$11,882.08	\$4,880.17	\$3,430.55	\$3,191.23	\$16,850.37	\$8,360.54	\$6,557.28	\$6,303.76

جدول ۴۴ خلاصه هزینه‌های ساخت استک SOFC : توان ۱۰ و ۲۵ کیلووات [45]

	30-kW Stack – 100-kW System				30-kW Stack – 250-kW System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$3,661.24	\$3,270.06	\$3,188.52	\$3,175.69	\$3,462.83	\$3,201.26	\$3,181.03	\$3,169.02
Labor	\$1,742.40	\$1,722.03	\$1,720.05	\$1,719.87	\$1,728.84	\$1,720.76	\$1,719.92	\$1,719.84
Machine	\$4,159.24	\$1,600.06	\$1,003.83	\$957.00	\$2,404.96	\$1,189.82	\$967.38	\$948.96
Scrap	\$741.54	\$507.28	\$452.99	\$448.29	\$585.66	\$468.78	\$449.44	\$447.19
Tooling	\$256.04	\$175.00	\$174.43	\$173.96	\$208.94	\$176.62	\$173.96	\$173.86
Part Total	\$10,560.45	\$7,274.43	\$6,539.82	\$6,474.81	\$8,391.23	\$6,757.23	\$6,491.73	\$6,458.88
# per System	4	4	4	4	10	10	10	10
Total Cost per System	\$42,241.82	\$29,097.72	\$26,159.27	\$25,899.23	\$83,912.25	\$67,572.34	\$64,917.28	\$64,588.83

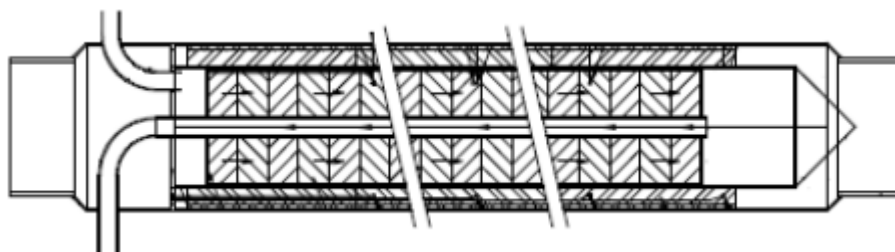
جدول ۴۵ خلاصه هزینه‌های ساخت استک SOFC : توان ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات [46]

۳-۹) ارزیابی هزینه‌های تولید BOP سیستم SOFC

سیستم‌های پردازش سوخت برای گاز طبیعی و پروپان، سوخت‌های انتخابی برای توان اولیه و برنامه‌های کاربردی CHP، برای هر تولیدکننده منحصر به فرد هستند و اطلاعات بسیار دقیقی در دسترس عموم قرار دادند. برای فراهم آوردن مبنایی برای هزینه، سیستم‌های پردازش سوخت واقعی توسط Battelle بر اساس تجربه با سیستم‌های کوچکتر و گفتگو با تامین کنندگان اجزاء مختلف طراحی شده است.

۹-۳-۱) سیستم اصلاح کننده‌ی بخار SOFC

برای ایجاد مبنایی برای تجزیه و تحلیل DFMA، فرض شده است اصلاح کننده^۱ بخار براساس طراحی اصلاح کننده بخار کاتالیزوری Catacel SSR (شکل ۷) می باشد. اصلاح کننده متشکل از یک استک از فن های با کاتالیزور پوشش داده شده می باشد.



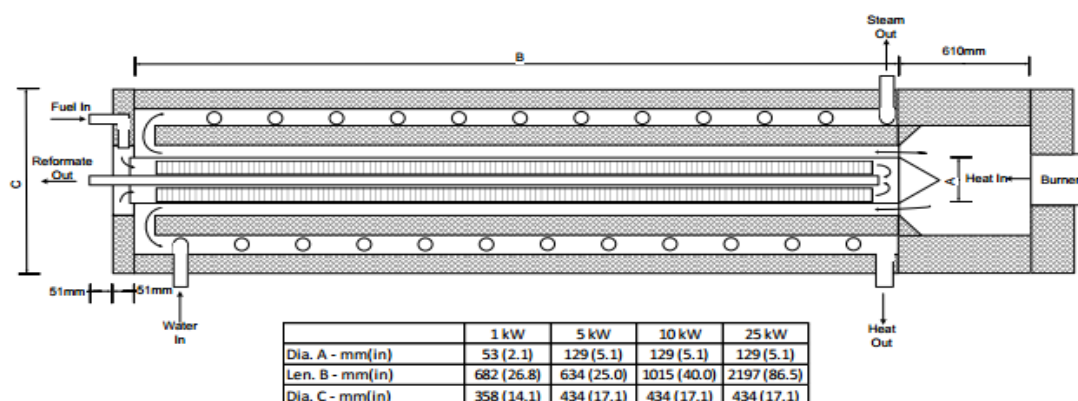
شکل ۷-۹ دیاگرام شماتیک Catacel SSR [45]

اندازه‌ی اصلاح کننده سیستم SOFC تا حدود ۴۵ درصد از اندازه‌ی اصلاح کننده سیستم PEM اندازه گرفته شده است.

جدول ۴۶ پارامترهای اندازه‌ی اصلاح کننده‌ی SOFC [45]

System Size (kW)	Reformer Size (kW)	Catalyst Area (cm ²)
1	0.65	2,491.66
5	3.24	12,458.30
10	6.48	24,916.60
25	16.20	62,291.49

System Size (kW)	Approximate Reformer Size	Target Catalyst Area (cm ²)
100	3 tubes @ 1,331 cm active fan length	3@0.81x10 ⁵ = 2.43x10 ⁵ total
250	7 tubes @ 1,331 cm active fan length	7@0.81 x10 ⁵ = 5.67x10 ⁵ total



شکل ۸-۹ دیاگرام شماتیک اصلاح کننده با ژنراتور بخار [45]

¹ Reformer

ابعاد نهایی اصلاح کننده برای هر اندازه سیستم در جدول ۴۷ نشان داده شده است.

	1 kW	5 kW	10 kW	25 kW
Overall Diameter (mm)	53	129	129	129
Overall Length (mm)	473	448	643	1,284
Flow Stages	27	24	48	65
Final Catalyst Area (cm ²)	2,526	12,629	25,258	63,145

Dimension	100 kW	250 kW
Overall Diameter (mm)	609	635
Overall Length (mm)	2,326	2,326
Flow Stages	3 tubes @ 168 = 504	7 tubes @ 168 = 1,176
Final Catalyst Area (cm ²)	232,550	565,950

جدول ۴۷ خلاصه‌ی اندازه‌ی اصلاح کننده‌ی SOFC [45]

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$46.63	\$43.12	\$41.75	\$41.52	\$111.88	\$104.43	\$101.64	\$101.57
Process	\$694.79	\$626.70	\$409.26	\$358.86	\$625.14	\$625.14	\$356.62	\$317.02
Scrap	\$37.07	\$33.49	\$22.55	\$20.02	\$36.85	\$36.48	\$22.91	\$20.93
Tooling	\$454.77	\$45.48	\$4.55	\$4.55	\$513.37	\$51.34	\$5.13	\$5.13
Manufactured Parts	\$1,233.25	\$748.79	\$478.11	\$424.95	\$1,287.24	\$817.38	\$486.31	\$444.66
Purchased Parts	\$17.23	\$17.23	\$17.23	\$17.23	\$28.12	\$28.12	\$28.12	\$28.12
Assembly	\$61.96	\$49.49	\$48.24	\$48.13	\$73.09	\$58.38	\$56.91	\$56.78
Total Cost	\$1,312.44	\$815.51	\$543.58	\$490.31	\$1,388.46	\$903.88	\$571.34	\$529.55

جدول ۴۸ خلاصه هزینه‌ی اصلاح کننده‌ی SOFC : سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$161.49	\$151.78	\$149.16	\$149.14	\$219.07	\$207.27	\$204.65	\$204.63
Process	\$1,307.27	\$710.42	\$682.72	\$640.15	\$1,645.39	\$1,297.71	\$861.90	\$801.69
Scrap	\$73.44	\$43.11	\$41.59	\$39.46	\$93.22	\$75.25	\$53.33	\$50.32
Tooling	\$579.35	\$57.94	\$5.79	\$5.79	\$744.36	\$74.44	\$7.44	\$7.44
Manufactured Parts	\$2,121.55	\$963.24	\$879.27	\$834.55	\$2,702.04	\$1,654.67	\$1,127.33	\$1,064.08
Purchased Parts	\$29.97	\$29.97	\$29.97	\$29.97	\$36.10	\$36.10	\$36.10	\$36.10
Assembly	\$89.61	\$71.57	\$69.77	\$69.61	\$138.68	\$110.76	\$107.97	\$105.78
Total Cost	\$2,241.13	\$1,064.79	\$979.01	\$934.13	\$2,876.81	\$1,801.52	\$1,271.39	\$1,205.96

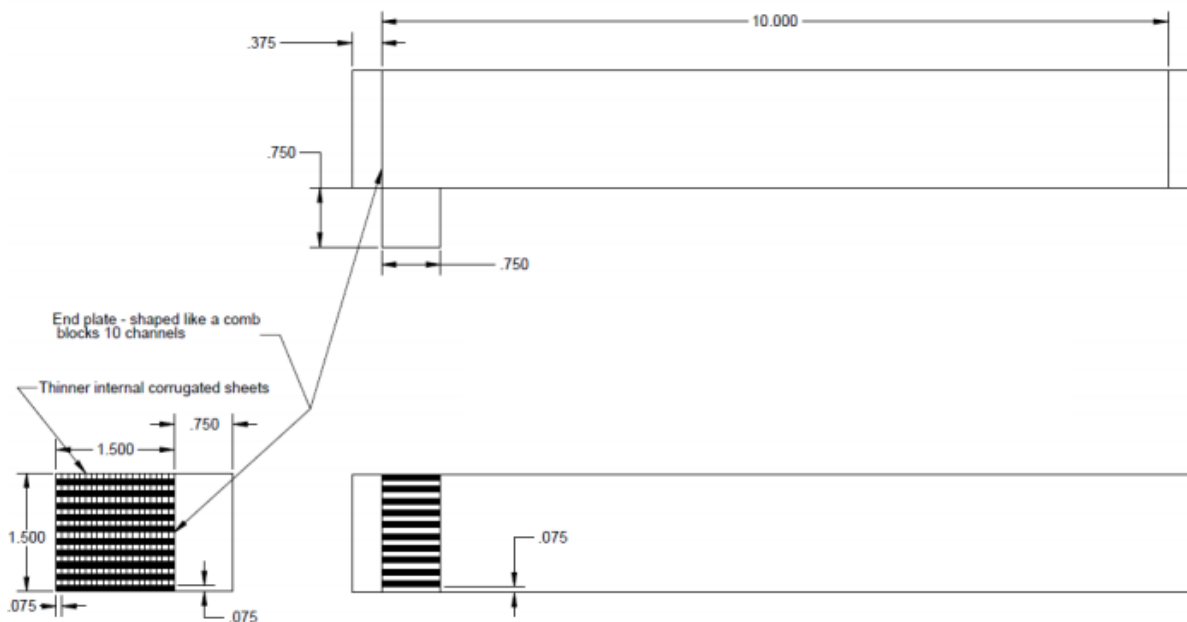
جدول ۴۹ خلاصه هزینه‌ی اصلاح کننده‌ی SOFC سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

	100-kW SOFC System				250-kW SOFC System			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$633.31	\$567.08	\$540.19	\$525.59	\$993.85	\$937.90	\$919.92	\$909.11
Process	\$1,026.93	\$585.89	\$585.89	\$505.71	\$2,333.63	\$1,604.52	\$1,158.38	\$1,125.13
Scrap	\$83.01	\$57.65	\$56.30	\$51.57	\$166.37	\$127.12	\$103.92	\$101.71
Tooling	\$1,844.96	\$184.50	\$36.90	\$25.83	\$3,481.09	\$348.11	\$69.62	\$48.74
Manufactured Parts	\$3,588.21	\$1,395.11	\$1,219.27	\$1,108.69	\$6,974.95	\$3,017.64	\$2,251.84	\$2,184.69
Catalyst	\$22.36	\$20.58	\$18.97	\$17.93	\$50.59	\$46.59	\$42.96	\$40.64
Purchased Parts	\$79.71	\$79.71	\$79.71	\$79.71	\$87.10	\$87.10	\$87.10	\$87.10
Assembly	\$379.39	\$303.03	\$295.39	\$294.71	\$747.40	\$596.96	\$581.91	\$570.13
Total Cost per System	\$4,069.68	\$1,798.42	\$1,613.33	\$1,501.04	\$7,860.04	\$3,748.28	\$2,963.81	\$2,882.56

جدول ۵۰ خلاصه هزینه‌ی اصلاح کننده‌ی SOFC سیستم ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلوواتی [46]

۹-۳-۲) مبدل حرارتی Recuperative Cathode System SOFC

سیستم مبدل حرارتی SOFC بر مبنای مبدل حرارتی هوا به هوا Catacel HEP است که در شکل ۹-۹ (ابعاد در اینچ) نشان داده شده است.



شکل ۹-۹ ابعاد طرح مبدل حرارتی SOFC [45]

	1 kW	5 kW	10 kW	25 kW
Width (mm)	38	91	183	457
Height (mm)	38	38	38	38
Length (mm)	254	254	254	254
Flow Channels	20	48	96	240
Heat Trans Area (cm ²)	1,423	3,319	6,571	16,326

جدول ۵۱ خلاصه‌ی ابعاد مبدل حرارتی SOFC [45]

مبدل‌های حرارتی عمدتاً از صفحه ورق ۰,۰۰۵ اینچ ساخته شده و پوسته و نقاط اتصال از مواد سنگین‌تر برای ساده‌سازی جوشکاری ساخته شده‌اند. مبدل‌های حرارتی برای تولید یک مونتاژ بدون نشت furnace-brazed می‌شوند. خلاصه هزینه‌ی مبدل حرارتی SOFC در جدول ۵۲ و ۵۳ آورده شده است.

	1 kW				5 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$4.71	\$4.26	\$3.89	\$3.81	\$11.79	\$10.66	\$10.05	\$9.96
Process	\$29.05	\$29.05	\$29.05	\$23.46	\$68.75	\$68.75	\$68.75	\$46.98
Scrap	\$1.69	\$1.67	\$1.65	\$1.36	\$4.03	\$3.97	\$3.94	\$2.85
Tooling	\$90.50	\$9.05	\$0.91	\$0.91	\$122.33	\$12.23	\$1.22	\$1.22
Part Cost	\$125.95	\$44.02	\$35.49	\$29.53	\$206.90	\$95.61	\$83.97	\$61.01
Assembly	\$31.22	\$24.94	\$24.31	\$24.25	\$57.01	\$45.54	\$44.39	\$44.29
Total Cost	\$157.17	\$68.96	\$59.80	\$53.79	\$263.91	\$141.15	\$128.36	\$105.30

جدول ۵۲ خلاصه هزینه‌ی مبدل حرارتی SOFC: سیستم ۱ و ۵ کیلوواتی [45]

	10 kW				25 kW			
	100	1,000	10,000	50,000	100	1,000	10,000	50,000
Material	\$22.37	\$20.22	\$19.57	\$19.50	\$53.15	\$48.99	\$48.28	\$48.25
Process	\$134.91	\$134.91	\$105.45	\$82.80	\$333.10	\$333.10	\$224.33	\$173.88
Scrap	\$7.86	\$7.76	\$6.25	\$5.12	\$19.31	\$19.10	\$13.63	\$11.11
Tooling	\$173.39	\$17.34	\$1.73	\$1.73	\$330.44	\$33.04	\$3.30	\$3.30
Part Cost	\$338.54	\$180.22	\$133.01	\$109.15	\$736.01	\$434.25	\$289.55	\$236.55
Assembly	\$102.43	\$81.81	\$79.75	\$79.57	\$293.44	\$234.37	\$228.47	\$223.84
Total Cost	\$440.97	\$262.04	\$212.76	\$188.72	\$1,029.45	\$668.62	\$518.02	\$460.39

جدول ۵۳ خلاصه هزینه‌ی مبدل حرارتی SOFC: سیستم ۱۰ و ۲۵ کیلوواتی [45]

۳-۹) مفروضات هزینه BOP، سیستم SOFC

هزینه‌های مربوط به اجزای BOP در جدول ۵۴ تا ۵۶ جدول‌بندی شده‌اند.

Subassembly	Component Description	Annual Production: 1kW SOFC Systems				Annual Production: 5kW SOFC Systems			
		(100)	(1,000)	(10,000)	(50,000)	(100)	(1,000)	(10,000)	(50,000)
Fuel Supply	Filter	\$112	\$102	\$93	\$89	\$112	\$102	\$93	\$89
	Compressor	\$507	\$406	\$385	\$374	\$682	\$570	\$520	\$494
	3-way valve (start-up bypass)	\$107	\$97	\$87	\$84	\$107	\$97	\$87	\$84
	Desulfurizer	\$644	\$99	\$68	\$61	\$893	\$162	\$122	\$111
Fuel Processing	Ejector	\$342	\$308	\$277	\$269	\$342	\$308	\$277	\$269
	Pre-Reformer	\$1,312	\$816	\$544	\$490	\$1,388	\$904	\$571	\$530
	Tail Gas Combustor	\$467	\$421	\$384	\$373	\$467	\$421	\$384	\$373
Start-up Air Supply (CPOX)	Filter & Housing	\$347	\$333	\$320	\$307	\$347	\$333	\$320	\$307
	Blower (Anode Air)	\$307	\$276	\$248	\$241	\$307	\$276	\$248	\$241
	Flow Meter	\$117	\$105	\$94	\$92	\$137	\$123	\$111	\$108
Cathode Air	Blower (Cathode Air)	\$307	\$276	\$248	\$241	\$418	\$376	\$339	\$329
	Flowmeter (Cathode Air)	\$137	\$123	\$111	\$108	\$144	\$130	\$117	\$113
Heat Recovery	Cathode Air Heater	\$157	\$69	\$60	\$54	\$264	\$141	\$128	\$105
	CHP Load Heater	\$135	\$122	\$111	\$108	\$355	\$319	\$291	\$284
	CHP Bypass Valve	\$166	\$149	\$134	\$130	\$198	\$178	\$160	\$155
AC Power	DC/AC Inverter	\$1,080	\$1,004	\$934	\$869	\$1,980	\$1,841	\$1,713	\$1,593
	Transfer Switch	\$105	\$95	\$85	\$77	\$308	\$262	\$209	\$188
	Resistor Bank	\$25	\$23	\$20	\$20	\$150	\$135	\$122	\$118
DC Power	DC/DC Converter (Power)	\$805	\$646	\$581	\$558	\$1,969	\$1,575	\$1,418	\$1,361
	Batteries	\$32	\$31	\$30	\$29	\$154	\$146	\$142	\$139
Instrumentation and Controls	Control Module	\$719	\$647	\$582	\$565	\$719	\$647	\$582	\$565
	DC/DC Converter (Controls)	N/A	N/A	N/A	N/A	\$134	\$121	\$109	\$105
	Wiring & Connectors	\$162	\$147	\$133	\$120	\$288	\$261	\$235	\$212
	Temperature Sensors	\$20	\$16	\$14	\$14	\$20	\$16	\$14	\$14
	Current Sensor	\$21	\$19	\$16	\$16	\$21	\$19	\$16	\$20
	Voltage Sensor	\$49	\$44	\$40	\$39	\$49	\$44	\$40	\$39
	H2S Sensor	\$243	\$219	\$210	\$204	\$243	\$219	\$210	\$204
	Stack Anode Pressure Sensor	\$226	\$203	\$182	\$177	\$226	\$203	\$182	\$177
Assembly Components	Assorted Plumbing/Fittings	\$407	\$370	\$335	\$300	\$488	\$444	\$400	\$360
	Assembly Hardware	\$41	\$37	\$33	\$30	\$49	\$44	\$40	\$36
	Frame & Housing	\$122	\$111	\$100	\$90	\$147	\$133	\$120	\$108
+ Work Est.	Additional Work Estimate	\$900	\$700	\$600	\$600	\$1,100	\$900	\$800	\$800
	TOTAL BOP COST	\$10,122	\$8,012	\$7,062	\$6,726	\$14,205	\$11,450	\$10,121	\$9,628

جدول ۵۴ هزینه‌های BOP سیستم SOFC با توان ۱ و ۵ کیلووات [45]

Subassembly	Component Description	Annual Production: 10kW SOFC Systems				Annual Production: 25kW SOFC Systems			
		(100)	(1,000)	(10,000)	(50,000)	(100)	(1,000)	(10,000)	(50,000)
Fuel Supply	Filter	\$112	\$102	\$93	\$89	\$112	\$102	\$93	\$89
	Compressor	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	3-way valve (start-up bypass)	\$107	\$97	\$87	\$84	\$107	\$97	\$87	\$84
	Desulfurizer	\$1,255	\$235	\$186	\$167	\$1,562	\$448	\$373	\$335
Fuel Processing	Ejector	\$342	\$308	\$277	\$269	\$342	\$308	\$277	\$269
	Pre-Reformer	\$2,241	\$1,065	\$979	\$934	\$2,877	\$1,802	\$1,271	\$1,206
	Tail Gas Combustor	\$467	\$421	\$384	\$373	\$467	\$421	\$384	\$373
Start-up Air Supply (CPOX)	Filter & Housing	\$347	\$333	\$320	\$307	\$495	\$464	\$445	\$427
	Blower (Anode Air)	\$307	\$276	\$248	\$241	\$466	\$420	\$378	\$366
	Flow Meter	\$144	\$130	\$117	\$113	\$133	\$120	\$108	\$105
Cathode Air	Blower (Cathode Air)	\$617	\$555	\$500	\$485	\$672	\$605	\$545	\$528
	Flowmeter (Cathode Air)	\$144	\$130	\$117	\$113	\$144	\$130	\$117	\$113
Heat Recovery	Cathode Air Heater	\$441	\$262	\$213	\$189	\$1,029	\$669	\$518	\$460
	CHP Load Heater	\$537	\$484	\$441	\$430	\$931	\$838	\$764	\$745
	CHP Bypass Valve	\$235	\$211	\$190	\$184	\$415	\$374	\$336	\$326
AC Power	DC/AC Inverter	\$3,600	\$3,348	\$3,114	\$2,896	\$9,540	\$8,872	\$8,251	\$7,674
	Transfer Switch	\$308	\$277	\$249	\$224	\$710	\$639	\$575	\$518
	Resistor Bank	\$300	\$270	\$243	\$236	\$900	\$810	\$729	\$707
DC Power	DC/DC Converter (Power)	\$3,900	\$3,000	\$2,700	\$2,592	\$9,900	\$7,200	\$6,600	\$6,300
	Batteries	\$556	\$527	\$515	\$504	\$738	\$700	\$683	\$670
Instrumentation and Controls	Control Module	\$719	\$647	\$582	\$565	\$719	\$291	\$262	\$254
	DC/DC Converter (Controls)	\$251	\$226	\$203	\$197	\$627	\$564	\$508	\$493
	Wiring & Connectors	\$484	\$440	\$396	\$356	\$1,077	\$979	\$881	\$793
	Temperature Sensors	\$20	\$16	\$14	\$14	\$20	\$16	\$14	\$14
	Current Sensor	\$32	\$29	\$25	\$33	\$32	\$29	\$25	\$33
	Voltage Sensor	\$49	\$44	\$40	\$39	\$49	\$44	\$40	\$39
	H2S Sensor	\$243	\$219	\$210	\$204	\$243	\$219	\$210	\$204
	Stack Anode Pressure Sensor	\$226	\$203	\$182	\$177	\$226	\$203	\$182	\$177
Assembly Components	Assorted Plumbing/Fittings	\$507	\$461	\$415	\$375	\$748	\$680	\$610	\$550
	Assembly Hardware	\$51	\$46	\$41	\$37	\$75	\$68	\$61	\$55
	Frame & Housing	\$152	\$138	\$124	\$112	\$224	\$204	\$183	\$165
+ Work Est.	Additional Work Estimate	\$1,400	\$1,100	\$1,000	\$1,000	\$2,100	\$1,700	\$1,500	\$1,400
	TOTAL BOP COST	\$20,094	\$15,599	\$14,205	\$13,538	\$37,682	\$30,014	\$27,011	\$25,471

جدول ۵۵ هزینه‌های BOP سیستم SOFC با توان ۱۰ و ۲۵ کیلووات [45]

System	Component Description	Annual Production of 100kW SOFC Systems				Annual Production of 250kW SOFC Systems			
		(100)	(1,000)	(10,000)	(50,000)	(100)	(1,000)	(10,000)	(50,000)
Fuel supply	Nat. Gas Filter	\$ 97	\$ 81	\$ 68	\$ 60	\$ 342	\$ 266	\$ 251	\$ 188
	Natural Gas Control Valve	\$ 1,788	\$ 1,453	\$ 1,229	\$ 1,182	\$ 2,619	\$ 2,287	\$ 1,997	\$ 1,816
	Desulfurizer	\$ 2,427	\$ 1,457	\$ 1,269	\$ 1,142	\$ 4,855	\$ 3,424	\$ 3,027	\$ 2,724
	3-way valve	\$ 137	\$ 115	\$ 97	\$ 86	\$ 137	\$ 115	\$ 97	\$ 86
Fuel Processor	Ejector	\$ 592	\$ 545	\$ 501	\$ 472	\$ 1,113	\$ 1,023	\$ 941	\$ 887
	Reformer/Burner	\$ 4,070	\$ 1,798	\$ 1,613	\$ 1,501	\$ 7,860	\$ 3,748	\$ 2,964	\$ 2,883
	Tail gas Burner	\$ 3,583	\$ 3,350	\$ 3,133	\$ 2,989	\$ 5,374	\$ 5,025	\$ 4,699	\$ 4,484
Air Supply	Air Filter	\$ 510	\$ 479	\$ 479	\$ 479	\$ 1,020	\$ 958	\$ 958	\$ 958
	Start-up Air Blower	\$ 961	\$ 854	\$ 758	\$ 698	\$ 3,049	\$ 2,818	\$ 2,586	\$ 2,586
	Start-up Air Flowmeter	\$ 1,493	\$ 1,405	\$ 1,317	\$ 1,229	\$ 1,493	\$ 1,405	\$ 1,317	\$ 1,229
	Start-up Diverter Valve	\$ 241	\$ 204	\$ 172	\$ 152	\$ 241	\$ 204	\$ 172	\$ 152
	Cathode Air Blower	\$ 961	\$ 854	\$ 758	\$ 698	\$ 3,049	\$ 2,818	\$ 2,586	\$ 2,586
	Cathode Air Flowmeter	\$ 1,493	\$ 1,405	\$ 1,317	\$ 1,229	\$ 1,493	\$ 1,405	\$ 1,317	\$ 1,229
Heat Recovery	Cathode Recuperator	\$ 18,800	\$ 17,580	\$ 16,439	\$ 15,685	\$ 28,200	\$ 26,369	\$ 24,658	\$ 23,528
	System Exhaust Valves	\$ 241	\$ 204	\$ 172	\$ 152	\$ 241	\$ 204	\$ 172	\$ 152
	CHP Export Exchanger	\$ 2,016	\$ 1,915	\$ 1,819	\$ 1,783	\$ 5,416	\$ 5,145	\$ 4,888	\$ 4,790
Power Electronics	Hybrid Inverter	\$ 42,000	\$ 33,600	\$ 26,400	\$ 21,600	\$ 96,000	\$ 75,000	\$ 57,000	\$ 45,000
	Batteries	\$ 5,690	\$ 5,464	\$ 5,269	\$ 5,060	\$ 11,765	\$ 11,298	\$ 10,897	\$ 10,465
	Resistor Bank	\$ 2,000	\$ 1,610	\$ 1,289	\$ 1,030	\$ 4,026	\$ 3,220	\$ 2,577	\$ 2,061
	Grid Interconnect Switch	\$ 1,204	\$ 1,084	\$ 975	\$ 878	\$ 2,645	\$ 2,381	\$ 2,142	\$ 1,928
Control and Instrumentation	Control Module	\$ 719	\$ 647	\$ 582	\$ 565	\$ 719	\$ 647	\$ 582	\$ 565
	Thermocouples	\$ 228	\$ 192	\$ 168	\$ 168	\$ 304	\$ 256	\$ 224	\$ 224
	H2S sensor	\$ 243	\$ 219	\$ 210	\$ 204	\$ 243	\$ 219	\$ 210	\$ 204
	Anode/cathode Pressure Sensor	\$ 904	\$ 812	\$ 728	\$ 708	\$ 2,260	\$ 2,030	\$ 1,820	\$ 1,770
Assembly Comp	Assorted Plumbing/Fittings	\$ 3,365	\$ 3,060	\$ 2,755	\$ 2,480	\$ 5,510	\$ 5,010	\$ 4,510	\$ 4,060
	Assembly Hardware	\$ 335	\$ 305	\$ 275	\$ 250	\$ 550	\$ 500	\$ 450	\$ 405
	Frame and Housing	\$ 1,005	\$ 915	\$ 825	\$ 745	\$ 1,650	\$ 1,500	\$ 1,350	\$ 1,215
	Additional Work Estimate	\$ 6,400	\$ 5,800	\$ 5,200	\$ 4,700	\$ 11,400	\$ 10,400	\$ 9,400	\$ 8,500
TOTAL BOP COST		\$ 103,503	\$ 87,405	\$ 75,818	\$ 67,927	\$ 203,575	\$ 169,675	\$ 143,793	\$ 126,677

جدول ۵۶ هزینه‌های BOP سیستم SOFC با توان ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلووات [46]

۹-۴) پیوست ۲ (وب سایت شرکت های تولیدکننده SOFC)

قاره آمریکا شمالی	
<u>Atrex Energy (USA)</u> 	www.atrexenergy.com
<u>Bloom Energy (USA)</u> 	www.bloomenergy.com
<u>Ceramatec (USA)</u> 	www.ceramatec.com
<u>Delphi (USA)</u> 	www.delphi.com
<u>FuelCell Energy (USA)</u> 	www.fuelcellenergy.com
<u>LG Fuel Cell Systems (USA)</u> 	no website
<u>MSRI (USA)</u> 	www.msrihome.com
<u>Protonex (USA)</u> 	www.protonex.com
<u>Ultra USSI (USA)</u> 	www.ultra-ussi.com
<u>Nexceris (USA)</u> 	www.nexceris.com

قاره اروپا	
<u>Adelan (United Kingdom)</u> 	www.adelan.co.uk
<u>Bosch Thermotechnology (Germany)</u> 	www.bosch-thermotechnology.com
<u>Ceres Power (United Kingdom)</u> 	www.cerespower.com
<u>Convion (Finland)</u> 	www.convion.fi
<u>Elcogen (Estonia, Finland)</u> 	www.elcogen.com
<u>Elring Klinger (Germany)</u> 	www.erlingklinger.com
<u>Haldor Topsøe (Denmark)</u> 	www.topsoe.com
<u>Kerafol (Germany)</u> 	www.kerafol.com
<u>Hexis/Viesmann (Germany)</u> 	www.hexis.com
<u>New enerday (Germany)</u> 	www.newenerday.com
<u>Plansee (Germany)</u> 	www.plansee.com

<u>SolidPower (Italy)</u> 	www.solidpower.com
<u>Sunfire/Staxera (Germany)</u> 	www.sunfire.de
<u>ZEG Power (Norway)</u> 	www.zegpower.com

قاره آسیا	
<u>Aisin-Seiki (Japan)</u> 	www.aisin.co.jp
<u>Chaozhou Three-Circle (China)</u> 	www.cctc.cc
<u>G-cell Technology (China)</u> 	www.gcell.com
<u>Gas Authority of India (India)</u>  GAIL (India) Limited	www.gailonline.com
<u>h2e Power Systems (India)</u> 	www.h2epower.net
<u>Huatsing Jingkun New Energy Technology (China)</u> 	www.huatsing-power.com
<u>Mitsubishi-Hitachi Heavy Industries (Japan)</u> 	www.mhi.com
<u>MiCo (China)</u> 	www.mico.kr
<u>SOFCMAN Energy Technology (China)</u> 	www.sofc.com.cn

References (۱۰

- [1] K. Kendall and M. Kendall, High-temperature solid oxide fuel cells for the 21st century: fundamentals, design and applications, Elsevier, 2015.
- [2] Bove, R; Ubertiny, S;, "Modeling solid oxides fuel cells methods, procedures and techniques," *Springer*, 2008.
- [3] K. Kendal, N. Q. Minh and S. C. Singhal, "High Temperature Solid Oxide Fuel Cells Fundamentals, Design and Applications," *Elsevier Publication*, no. Chapter8, 2004.
- [4] Vinod, M; Janardhanan; Deutschmann;, "Modeling of Solid-Oxide Fuel Cells: Review paper, Edited by Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Munchen, Germany," 2007.
- [5] ک. و.ر, پایان نامه ارشد تحلیل نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد, تهران: دانشگاه علم و صنعت, ۱۳۸۸
- [6] DocentJinliang Yuan, "Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs)," *Department of Energy Sciences*, November, 2008.
- [7] سایت ستاد ویژه توسعه فناوری "م. تنهایی, "بررسی کاربرد فناوری نانو در الکترولیت پیل های سوختی اکسید جامد نانو, 1935.
- [8] G. Hoogers, "Fuel cell technology handbook," *CRC Press*, September 2002.
- [9] McPhail, J. Stephen, Luigi Leto and Boigues-Munoz, "The yellow pages of SOFC technology," International Status of SOFC Deployment. IEA-Implementing Agreement Advanced Fuel Cells, ENEA National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Rome, 2013.
- [10] "www.aisin.co.jp".
- [11] "https://global.kyocera.com/news/2017/0702_bnfo.html".
- [12] "https://www.nedo.go.jp".
- [13] "https://www.nedo.go.jp".
- [14] McPhail, S J; Kiviaho, J; Conti, B;, "The yellow pages of SOFC technology," *International Status of SOFC deployment 2017*, 2017.

- [15] Cigolotti, V; McPhail, S;, "ITALIAN NATIONAL AGENCY FOR NEW TECHNOLOGIES, ENERGY AND SUSTAINABLE ECONOMIC DEVELOPMENT".
- [16] "www.delphi.com".
- [17] "Fuel Cell Technologies Office," *Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan*.
- [18] "wikipedia.org".
- [19] "https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technologies-office".
- [20] 1390, "ح. محبي, "توسعه و جایگاه پیل سوختی اکسید جامد در دنیا
- [21] Elcogen, "Solid Oxide Fuel Cells Opportunities for a clean energy future," http://www.elcogen.com/wp-content/uploads/2018/04/LSM_ELC_WhitePaper-FINAL.compressed.pdf.
- [22] Buchkremer, H., Diekmann, U., and Stöver, D, "Component Manufacturing and Stack Integration of Anode-supported Planar Sofc System," *Proceedings of the Second European Solid Oxide Fuel Cell Forum*, vol. 1, pp. 221-228, 1996.
- [23] Tietz, F., Buchkremer, H. P., and Stöver, D, "Components Manufacturing for Solid Oxide Fuel Cells," *Solid State Ionics*, vol. 152, pp. 373-381, 2002.
- [24] Zhang, Y, "Fabrication and Characterisation of Planar and Tubular Solid Oxide Fue Cell Anodes," *Edinburgh Napier University, MSc by Research*, vol. 2, pp. 24-24, 2013.
- [25] De Souza, S., Visco, S. J., and De Jonghe, L. C, "Thin-film Solid Oxide Fuel Cell with High Performance at Low-temperature," *Solid State Ionics*, vol. 98, pp. 57-61, 1997.
- [26] Singhal, S, "High-Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications: Fundamentals, Design and Applications," *Elsevier, USA, Washington*, 2003.
- [27] Robert Mücke, "Introduction to SOFC Technologies Manufacturing of SOFCs," 2011.

- [28] Holtappels, P., and Stimming, U, "Solid Oxide Fuel Cells (Sofc)," in: *Handbook of Fuel Cells, John Wiley & Sons, Ltd, New York, 2010.*
- [29] Huang, K., and Goodenough, J. B, "Solid Oxide Fuel Cell Technology: Principles, Performance and Operations," *Elsevier, England, Cambridge, 2009.*
- [30] Iwasita, T., Vielstich, W., Lamm, A., and Gasteiger, H, "Handbook of Fuel Cells," *Wiley, New York, USA, 2003.*
- [31] چهارمین سمینار پیل سوختی ایران, "آ. ر. و. همکاران, "ساخت تگ سل پیل سوختی اکسید جامد", 1389.
- [32] J.-H. Song, S.-I. Park, J.-H. Lee, and H.-S. Kim, "Fabrication characteristics of an anode-supported thin-film electrolyte fabricated by the tape casting method for IT-SOFC," *Journal of materials processing technology*, vol. 198, pp. 414-418, 2008.
- [33] Kim, S. D., Lee, J. J., Moon, H., Hyun, S. H., Moon, J., Kim, J., and Lee, H. W, "Effects of Anode and Electrolyte Microstructures on Performance of Solid Oxide Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, vol. 169, pp. 265-270, 2007.
- [34] Pierre, A. C, "Introduction to Sol-gel Processing," *Springer, New York, 1998.*
- [35] Xu, Z., Rajaram, G., Sankar, J., and Pai, D, "Electrophoretic Deposition of YSZ Electrolyte Coatings for Sofcs," *Fuel Cells Bulletin*, vol. 2007, pp. 12-16, 2007.
- [36] "<http://www.nanoo1.blogfa.com/post/4>".
- [37] Li, Q., Fan, Y., Zhao, H., Sun, L.-P., and Huo, L. H., "Preparation and Electrochemical Properties of a Sm₂-X Srx NiO₄ Cathode for an It-Sofc," *Journal of Power Sources*, vol. 167, pp. 64-68, 2007.
- [38] Hui, R., Wang, Z., Yick, S., Maric, R., and Ghosh, D, "Fabrication of Ceramic Films for Solid Oxide Fuel Cells Via Slurry Spin Coating Technique," *Journal of Power Sources*, vol. 172, pp. 840-844, 2007.
- [39] Fergus, J., Hui, R., Li, X., Wilkinson, D. P., and Zhang, J, "Solid Oxide Fuel Cells: Materials Properties and Performance," *CRC Press, New York, 2008.*

- [40] Wang, Z., Qian, J., Cao, J., Wang, S, and Wen, T, "A Study of Multilayer Tape Casting Method for Anode-supported Planar Type Solid Oxide Fuel Cells (Sofcs)," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 437, pp. 264-268, 2007.
- [41] Choy, K, "Chemical Vapour Deposition of Coatings," *Progress in Materials Science*, vol. 48, pp. 57-170, 2003.
- [42] Tang, Z., Burgess, A., Kesler, O., White, B., and Ben-Oved, N, "Manufacturing Solid Oxide Fuel Cells with an Axial-injection Plasma Spray System," *Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions: Proceedings of the 2007 International Thermal Spray Conference*, pp. 307-309, 2007.
- [43] Filipovic, L., Selberherr, S., Mutinati, G. C., Brunet, E., Steinhauer, S., Köck, A., Teva, J., Kraft, J., Siegert, J., and Schrank, F, "Modeling Spray Pyrolysis Deposition," *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 2, pp. 987-992, 2013.
- [44] Rey-Mermet, S., and Muralt, P, "Microfabricated Solid Oxide Fuel Cells," vol. 3, pp. 53-53, 2008.
- [45] B. M. Institute, "Manufacturing Cost Analysis of 1,5,10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications," *U.S. Department of Energy*, January 2017.
- [46] B. M. Institute, "Manufacturing Cost Analysis of 100 and 250 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications," *U.S. Department of Energy*, January 2017.
- [47] R. Scataglini, "A Direct Manufacturing Cost Model for Solid-Oxide Fuel Cell Stacks," *Fuel Cells*, pp. 825-842, 2017.
- [48] "air.ir/Zmqxvb".
- [49] Fabbri, E; Magrasó , A; Pergolesi, D;, "Low-temperature solid-oxide fuel cells based on proton-conducting electrolytes," *Materials Research Society* , vol. 39, pp. 792-797, 2014.
- [50] Albrechta, K J; Duanb, C; O'Hayreb, R P; Brauna, R J;, "Modeling Intermediate Temperature Protonic Ceramic Fuel Cells," *ECS Transactions*, vol. 68, pp. 3165-3175, 2015.

- [51] "www.atrexenergy.com".
- [52] "www.bloomenergy.com".
- [53] "www.ceramatec.com".
- [54] "www.delphi.com".
- [55] "www.fuelcellenergy.com".
- [56] "www.msrihome.com".
- [57] "www.protonex.com".
- [58] "www.ultra-ussi.com".
- [59] "www.elcogen.com".
- [60] "www.adelan.co.uk".
- [61] "www.bosch-thermotechnology.com".
- [62] "www.cerespower.com".
- [63] "www.convion.fi".
- [64] "www.kerafol.com".
- [65] "www.hexis.com".
- [66] "www.plansee.com".
- [67] "www.gcell.com".
- [68] "www.h2epower.net".
- [69] "www.mhi.com".
- [70] S. D. Vora, "U.S. DOE Office of Fossil Energy Solid Oxide Fuel Cell Program," *National Energy Technology Laboratory*, June 13 , 2018.
- [71] K. YOKO-moto, "6th International Workshop on Hydrogen Infrastructure and Transportation," 11-12 Sep 2018.
- [72] "http://www.eguchi-lab.ehcc.kyoto-u.ac.jp/SOFC_XVI/general.html".
- [73] "<https://waset.org/conference/2019/09/tokyo/ICSOFCT>".

- [74] "www.suna.org.ir".
- [75] "www.researchandmarkets.com".
- [76] T. Fawcett, "Solid Oxide Fuel Cells: Energy for the Future," *Stanford University*, November 16, 2015.
- [77] "www.strategymrc.com".
- [78] Kabata, T; Nishiura, M; Koga, S; Matake, N; "Fuel Cell Semina & Exposition," *Phoenix*, pp. 263-267, 2008.
- [79] Oldham; Charles;, "Fuel Cell Council," *Industry Overview*, 2010.
- [80] C. K. Green, "Development of a Leakage Model for Solid Oxide Fuel Cell Compressive Seals," *Georgia Institute of Technology, USA*, 2007.
- [81] D. Herman, " Assessment of Solid Oxide Fuel Cell Technology," *Techcal Report, EPRI solutions, USA*, 2002.
- [82] Gross, M. D., Vohs, J. M., and Gorte, R. J, "A Study of Thermal Stability and Methane Tolerance of Cu-based Sofc Anodes with Electrodeposited Co," *Electrochimical Acta*, vol. 52, pp. 1951-1957, 2007.
- [83] Franco, T., Ilhan, Z., Lang, M., Schiller, G., and Szabo, P, "Investigation of Porous Metallic Substrates for Plasma Sprayed Thin-film Sofcs," *Solid Oxide Fuel Cells IX (SOFCIX)*, pp. 344-352, 2005.
- [84] Ormerod, R M, "High Temperature Solid Oxide Fuel Cells Fundamentals Design and Applications," *Elsevier* , 2003.
- [85] "www.aisin.co.jp".