

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



موسسه آموزش عالی انرژی

دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی سیستم‌های انرژی گرایش سیستم

عنوان:

آنالیز انرژی (انرژی اکنومیک و انرژی اینوارومتال) یک سیستم هیبریدی SOFC-GT-RO

استاد راهنما:

دکتر محمد حسین احمدی

دکتر یوسف یاسی

استاد مشاور:

دکتر حیدر مداح

پژوهشگر:

محمد عاطفی نژاد

زمستان ۱۳۹۶



حوزه معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی

موسسه آموزش عالی انرژی

تعهدنامه اصالت پایان نامه

اینجانب محمد عاطفی نژاد دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد ناپیوسته در رشته مهندسی سیستم های انرژی گرایش سیستم که در تاریخ ۵ بهمن ماه ۱۳۹۶ از پایان نامه خود با عنوان آنالیز انرژی (انرژی اکونومیک و انرژی اینوومنتال) یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی با اسمز معکوس با کسب نمرهو درجهدفاع نموده ام بدین وسیله اعتراف می کنم:

(۱) این پایان نامه حاصل تحقیق و پژوهش اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران (اعم از پایان نامه، کتاب، مقاله و) استفاده کرده ام، مطابق ضوابط موجود، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در فهرست منابع ذکر و درج نموده ام.

(۲) این پایان نامه قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم سطح، پایین تر یا بالاتر) در سایر دانشگاه ها و مؤسسات آموزش عالی داخلی و خارجی ارائه نشده است.

ضمناً متعهد می شوم:

(۳) چنانچه بعد از فراغت از تحصیل، قصد استفاده و هر گونه بهره برداری اعم از چاپ مقاله، کتاب، ثبت اختراع و ... از این پایان نامه را داشته باشم، از استاد محترم راهنما و گروه آموزشی مربوطه مجوزهای لازم را اخذ نمایم.

(۴) چنانچه در هر مقطع زمانی خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشی از آن را بپذیرم و موسسه آموزش عالی انرژی مجاز است با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات رفتار نموده و در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام، هیچگونه ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضاء:

سپاسگزاری

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود . در اینجا بر خود لازم می دانم از تمامی اساتید به ویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و فضائل اخلاقی یاری نموده اند تقدیر و تشکر نمایم .

از استادان گرامی و بزرگوار جناب آقایان دکتر محمد حسین احمدی و دکتر یوسف یاسی که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق پژوهش و نگارش این پایان نامه تقبل نموده اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم .

از جناب آقای دکتر حیدر مداح به عنوان مشاور که راهنمایی خود مرا مورد لطف قرار داده اند کمال تشکر را دارم .

تقدیم به بهترین های زندگی

پدر و مادر عزیز تر از جانم به پاس فداکاری هایشان و تقدیم به تمامی پویندگان علم و معرفت .

چکیده

پیل سوختی اکسید جامد به دلیل انعطاف پذیری و دمای کارکرد بالا راندمان بسیار خوبی که دارد مورد اهمیت و مطالعه قرار گرفته است. کار حاضر به آنالیز اگزرژی و اگزرژی اقتصادی و محیط زیستی یک پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز اسمز معکوس می باشد که به تولید همزمان برق و حرارت و همچنین آب شیرین کردن منابع آبی کمک می کند. پروژه مورد نظر توسط نرم افزار اسپن هایسیس شبیه سازی شده است که یکی از وسیع ترین و کاربردی ترین نرم افزار های مهندسی می باشد. نتایج اگزرژی کل سیستم ۷۶,۹۸٪ و اتلاف سیستم حدود ۴۰۹۱۴۳ کیلوژول بر ساعت می باشد و بهینه سازی هر کدام به ترتیب ۷۷,۱۵٪ و ۳۸۵۶۹۰ کیلوژول بر ساعت به دست آمد همچنین آنالیز اقتصادی و محیط زیستی نیز برای سیستم مورد نظر انجام گردید. بهینه سازی توان الکتریکی سیستم از ۳۰۸۰ کیلو وات به ۳۱۹۲ کیلو وات افزایش یافت. این سیستم به دلیل راندمان بالا و چند منظوره بودن جزو سیستم های پر کاربرد در آینده خواهد بود.

کلمات کلیدی

پیل سوختی اکسید جامد - توربین گازی - اگزرژی - اگزرژی اقتصادی - اگزرژی محیط زیستی - اسمز معکوس

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول مقدمه " کلیات تحقیق و بررسی مفاهیم	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ اهمیت و ضرورت تحقیق	۲
۳-۱ هدف تحقیق	۳
۱-۳-۱ هدف اصلی	۳
۲-۳-۱ هدف فرعی	۳
۴-۱ بیان مساله	۳
۵-۱ فرضیه های تحقیق	۴
۶-۱ تعریف پیل سوختی	۴
۷-۱ ساختمان پیل سوختی	۵
۱-۷-۱ اجزای ساختمان پیل سوختی	۵
۲-۷-۱ عملکرد ساختمان پیل سوختی	۷
۸-۱ مزایای پیل سوختی	۷
۹-۱ معایب پیل سوختی	۸
۱۰-۱ کاربرد پیل های سوختی	۸
۱۱-۱ بخش تبدیل انرژی	۹
۱-۱۱-۱ توسعه پیل های سوختی در جهان	۹
۲-۱۱-۱ توسعه در آمریکا	۱۰
۳-۱۱-۱ توسعه در اروپا	۱۱
۴-۱۱-۱ توسعه در آسیا	۱۲
۱۲-۱ انواع پیل سوختی	۱۲
۱-۱۲-۱ انواع پیل های سوختی و کاربرد های آن	۱۲
۱۳-۱ زمینه های مختلف استفاده از پیل های سوختی	۲۲
۱۴-۱ به روز ترین روش تولید پیل سوختی	۲۳
۱۵-۱ پیل سوختی اکسید جامد	۲۳
۱-۱۵-۱ مزایای پیل سوختی اکسید جامد	۲۳
۲-۱۵-۱ رایج ترین مواد مورد استفاده برای لجزاء پیل سوختی اکسید جامد	۲۳
۳-۱۵-۱ انواع پیل سوختی اکسید جامد	۲۵
۱-۳-۱۵-۱ طرح لوله ای	۲۷
۲-۳-۱۵-۱ طرح یکپارچه	۲۷

۲۸	۱-۱۵-۳ طرح صفحه ای
۲۹	۱-۱۵-۴ کاربرد پیل های سوختی اکسید جامد
۲۹	۱-۱۵-۵ تحلیل الکتروشیمیایی پیل سوختی اکسید جامد
۳۰	۱-۱۶ انواع ساختارهای پیل های سوختی نوع مسطح از نظر نوع تکیه
۳۳	فصل دوم پیشینه پژوهش
۳۴	۲-۱ توربین ها
۳۴	۲-۲ ساختار پیل های سوختی اکسید جامد توربین گازی
۳۴	۲-۳ اسمز معکوس :
۳۴	۱-۳-۱ ساختار اسمز معکوس
۳۶	۲-۴ مفهوم قانون اول ترمودینامیک :
۳۷	۲-۵ مفهوم انرژی و قانون دوم ترمودینامیک
۳۷	۲-۶ ادبیات گذشته و کارهای دیگران
۴۹	۲-۷ ابزار SOFC
۴۹	۲-۸ پیکربندی پیل سوختی اکسید جامد با توربین گازی :
۵۳	فصل سوم مبانی نظری
۵۴	۳-۱ مقدمه
۵۴	۳-۲ توضیح فرآیند
۵۷	۳-۳ واکنش های فرایند
۵۹	۳-۴ ناحیه آند
۵۹	۳-۵ ناحیه مشعل (برنر یا محفظه احتراق)
۶۰	۳-۶ چرخه توربین گازی
۶۰	۳-۷ ویژگی های عمده ی غشاهای اسمزی
۶۰	۳-۸ فرضیه های پروژه
۶۱	۳-۹ آنالیز های انرژی
۶۱	۳-۹-۱ مبانی و تعاریف تحلیل انرژی
۶۴	۳-۱۰ توان قدرت
۶۵	۳-۱۱ محفظه احتراق
۶۵	۳-۱۲ سلول سوختی اکسید جامد
۶۶	۳-۱۳ پمپ
۶۸	۳-۱۴ آنالیز انرژی اقتصادی
۷۱	۳-۱۵ انرژی محیط زیستی (انرژی و اینوارومنتال)
۷۳	فصل چهارم: تحلیل نتایج شبیه سازی
۷۴	۴-۱ مقدمه

۷۵	۲-۴- شبیه سازی
۸۸	۳-۴- آنالیز انرژی
۹۰	۴-۴- نتایج بررسی اقتصادی
۹۴	۵-۴- نتایج آنالیز تخریب آکسرژی
۹۵	۶-۴- نتایج آنالیز بازده آکسرژی
۹۵	۷-۴- نتایج آگزرو اقتصادی
۱۰۰	۸-۴- نتایج آنالیز آگزرو محیط زیستی
۱۰۰	۹-۴- هزینه های زیست محیطی
۱۰۱	۱۰-۴- اعتبار سنجی
۱۱۵	۱۱-۴- نتایج توان الکتریکی سیستم
۱۱۸	فصل پنجم نتیجه گیری کلی
۱۱۹	۱-۵- نتایج
۱۱۹	۵-۲- پیشنهادات
۱۲۰	فصل ششم منابع

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ فعالیت SOFC با تقسیم جغرافیایی.	۹
شکل ۲-۱ نمونه هایی از پیل سوختی با ژنراتورهای مختلف	۱۱
شکل ۳-۱ شماتیک پیل سوختی غشاء پروتون	۱۴
شکل ۴-۱ شماتیک پیل سوختی قلیایی	۱۶
شکل ۵-۱ شماتیک پیل سوختی اسید فسفریک	۱۸
شکل ۶-۱ شماتیک پیل سوختی کربنات مذاب	۱۹
شکل ۷-۱ شماتیک پیل سوختی اکسید جامد	۲۰
شکل ۸-۱ پیل سوختی نوع صفحه ای.	۲۵
شکل ۹-۱ پیل سوختی نوع لوله ای	۲۶
شکل ۱۰-۱ جریان ها و اجزاء پیل سوختی نوع لوله ای	۲۷
شکل ۱۱-۱ طراحی یکپارچه پیل سوختی با تنظیم جریان گازی	۲۸
شکل ۱۲-۱ طراحی یکپارچه پیل سوختی با جریان متقابل گاز	۲۸
شکل ۱۳-۱ تعداد واحد های SOFC که به طور جهانی توسط برنامه های نصب شده اند.	۲۹
شکل ۱۴-۱ نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد	۳۰
شکل ۱۵-۱ شماتیک پیل سوختی اکسید جامد.	۳۱
شکل ۱۶-۱ شماتیک طراحی پیکربندی استک اکسید جامد	۳۲
شکل ۱۷-۱ لایه های مختلف پیل سوختی اکسید	۳۲
شکل ۱-۲ منحنی قطبیت پیل سوختی	۴۲
شکل ۲-۲ یک مقطع از پیل سوختی اکسید جامد لوله ای با ریفرمینگ داخلی غیر مستقیم	۴۳
شکل ۳-۲ میزان استفاده از سیستم های آب شیرین کن	۴۶
شکل ۴-۲ میکروساختار ویستینگهوس SOFC	۴۷
شکل ۵-۲ نمودار پیل سوختی اکسید جامد و اتصالات آن ها.	۴۹
شکل ۶-۲ چرخه هیبریدی شاده را نشان می دهد	۵۱
شکل ۱-۳ شماتیک سیستم هیبریدی SOFC-GT-RO	۵۶
شکل ۲-۳ شماتیک مربوط به مراحل تصفیه آب و اجزای آن	۶۰
شکل ۱-۴ شماتیک کلی شبیه سازی با نرم افزار Aspen Hysys	۷۸
شکل ۲-۴ طراحی میدل حرارتی Ar با Aspen Exchanger Design and Rating	۷۹
شکل ۳-۴ طراحی میدل حرارتی FR با Aspen Exchanger Design and Rating	۸۳
شکل ۴-۴ شبیه سازی واحد با Aspen Energy Analyzer	۸۸
شکل ۵-۴ شماتیک شبیه سازی واحد با Aspen Economics Ananlyzer	۸۹

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱ زمان سنجی و فازهای برخی مواد سوختی.....	۱۰
جدول ۲-۱ اجزای یک سلول الکتروشیمیایی اکسید جامد.....	۳۱
جدول ۱-۴ مشخصات فرایندی هوا.....	۷۶
جدول ۲-۴ مشخصات فرایندی سوخت.....	۷۶
جدول ۳-۴ ترکیب درصد جریان هوا.....	۷۷
جدول ۴-۴ ترکیب درصد جریان سوخت.....	۷۷
جدول ۵-۴ نتایج طراحی مبدل حرارتی هوا.....	۸۱
جدول ۶-۴ نتایج طراحی مبدل حرارتی سوخت.....	۸۵
جدول ۷-۴ مشخصات جریان خروجی از راکتور محفظه احتراق.....	۸۷
جدول ۸-۴ درصد ترکیبات در جریان خروجی از محفظه احتراق.....	۸۷
جدول ۹-۴ آنالیز انرژی واحد.....	۸۹
جدول ۱۰-۴ تحلیل اقتصادی واحد.....	۹۰
جدول ۱۱-۴ داده های مورد نیاز محاسبه آگرژی.....	۹۳
جدول ۱۲-۴ هزینه های عملیاتی و سرمایه.....	۹۵
جدول ۱۳-۴ تغییرات قیمت و قیمت هر جریان آگرژی.....	۹۶
جدول ۱۴-۴ نتایج آگرژو اکونومیک سیستم.....	۹۸
جدول ۱۵-۴ میزان انتشار گازهای آلاینده.....	۱۰۰
جدول ۱۶-۴ یوتیلیتی دما بالا و دما پایین.....	۱۰۱
جدول ۱۷-۴ مقایسه پیل سوختی آلی.....	۱۰۸
جدول ۱۸-۴ مقایسه نوع صفحه ای و لوله ای پیل سوختی.....	۱۰۹
جدول ۱۹-۴ جدول توان الکتریکی تجهیزات سیستم.....	۱۰۹
جدول ۲۰-۴ بازده آگرژی سیستم.....	۱۱۰
جدول ۲۱-۴ میزان اتلاف آگرژی تجهیزات و سیستم.....	۱۱۲
جدول ۲۲-۴ بهبود بازده آگرژی.....	۱۱۳

جدول ۲۳-۴ بهبود ائتلاف اگزرژی..... ۱۱۴

جدول ۲۴-۴ بهبود توان الکتریکی..... ۱۱۴

جدول ۲۵-۴ نتایج آنالیز انرژی..... ۱۱۵

فهرست نمودار ها

عنوان	صفحه
نمودار ۴-۱ اتلاف اکسرژی تجهیزات و سیستم مورد استفاده در فرایند.....	۹۴
نمودار ۴-۲ بازده اکسرژی تجهیزات مورد استفاده.....	۹۵
نمودار ۴-۳ مقایسه هزینه های عملیاتی.....	۹۹
نمودار ۴-۴ تغییرات توان الکتریکی سیستم.....	۱۱۰
نمودار ۴-۵ بازده اگزرژی سیستم و تجهیزات.....	۱۱۱
نمودار ۴-۶ تغییرات اتلاف اگزرژی سیستم.....	۱۱۲
نمودار ۴-۷ بهبود بازده اگزرژی تجهیزات و سیستم.....	۱۱۳
نمودار ۴-۸ بهبود اتلاف اگزرژی سیستم.....	۱۱۴
نمودار ۴-۹ بهبود توان الکتریکی سیستم.....	۱۱۵
نمودار ۴-۱۰ نتایج آنالیز انرژی.....	۱۱۶

فصل اول مقدمه " کلیات تحقیق و بررسی مفاهیم

۱-۱ مقدمه

با توجه به روند روبه رشد مصرف انرژی در جهان استفاده از روش ها و سیستم های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلاینده‌گی پایین تر در اولویت قرار گرفته است . امروزه ، با گسترش سیستم های مختلف تولید انرژی ، روش های گوناگونی مانند استفاده از انرژی خورشیدی، انرژی باد، پیل های سوختی، میکروتوربین ها و دیزل ژنراتورها مورد توجه قرار گرفته اند که هر کدام از این روش ها دارای مزیت ها و معایب مخصوص به خود هستند . داشتن یک سیستم تولید انرژی قابل اعتماد، کم هزینه و همیشه در دسترس استفاده از پیل های سوختی را به عنوان یک کاندیدای مهم معرفی کرده است .

۱-۲ اهمیت و ضرورت تحقیق

پیل های سوختی اکسید جامد به خودی خود در محدوده دمای بالا و به دلیل مزایایی همچون عاری از آلاینده‌گی و انعطاف پذیری اهمیت پیدا کرده است همچنین با کوبل شدن با سایر سیستم ها مثل توربین گازی بازده آنها بالاتر می رود. اسمز معکوس که به عنوان آب شیرین کن استفاده میشود با اتصال به سیستم پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی به یک سیستم قدرتمند تبدیل می شود که کار سیستم اسمز معکوس توسط سیستم پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی^۱ تامین می گردد. امروزه در مناطقی که آب آن ها شور و ناخالص بوده و نیاز به فیلتراسیون می باشد این سیستم توصیه می گردد. همچنین این سیستم از سایر سیستم ها بازده بالاتری داشته و با توجه به اهمیت کشورها به آلاینده‌گی این سیستم دوست دار محیط زیست می باشد. نیاز به وجود سیستم ها با آلودگی کم و بهینه سازی در مصرف انرژی از لحاظ اقتصادی ضرورت این موضوع را روز به روز بیشتر می کند. به طور خلاصه اهمیت و ضرورت این مساله به شرح ذیل می باشد:

- کاهش آلاینده‌گی و بررسی آنالیز محیط زیستی بر اساس توافقات جهانی کیوتو و پاریس .
- افزایش راندمان سیستم و بهینه سازی آن نسبت به سایر سیستم های از قبل پیشنهاد شده .
- رقابت این سیستم از نظر بازده و اقتصادی و زیست محیطی نسبت به سایر.

۱-۳ هدف تحقیق

هدف کار حاضر این است که مدل سلول سوختی اکسید جامد + یک سیکل ترکیبی از منظر انرژی و اقتصادی و زیست محیطی (چند منظوره) و بهینه سازی سیستم طراحی شود. پژوهش مورد نظر شامل مطالعه جامع از اصلاح چرخه پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی با اسمز معکوس^۲ از لحاظ آنالیز انرژی و انرژی و انرژی اقتصادی و جنبه های محیطی زیستی (انرژی و انرژی و انرژی) می باشد.

۱-۳-۱ هدف اصلی

مدلسازی و شبیه سازی سیستم ترکیبی مد نظر .

۱-۳-۲ هدف فرعی

آنالیز انرژی و انرژی و انرژی اکونومیک و انرژی و انرژی و انرژی این سیستم و بهینه سازی آن شبیه سازی با نرم افزار اسپن هایسیس که یکی از پیشرفته ترین و گسترده ترین نرم افزارهای شبیه سازی در زمینه مهندسی می باشد. آنالیزها توسط اکسل و با کمک نرم افزار اسپن هایسیس نمودار بندی و مقایسه شده است.

۱-۴ بیان مساله

وجود آلودگی زیستی با افزایش صنایع و جمعیت و همچنین لزوم بر بهبود در مصرف انرژی از لحاظ انرژی و اقتصادی اهمیت این پروژه را چندین برابر می کند . همچنین با وجود بحران آب نیاز به نمک زدایی و شیرین کردن آب مخصوصا برای ساکنین اطراف منابع آبی می تواند کمک به سزایی در مصرف بهینه آبی و عدم کمبود آب در آینده باشد . تولید همزمان برق و حرارت و آب به عنوان یک سیستم بهینه (نیروگاهی) کمک شایانی در مدیریت مصرف انرژی و کاهش تلفات و بهبود شرایط سیستم خواهد کرد . سیستم مورد نظر علاوه بر تولید همزمان برق و حرارت به تامین انرژی مورد نیاز برای یک سیستم اسمز معکوس و شیرین کردن آب (آب دریا) می انجامد. ضرورت این مسئله در توافقات بین المللی برای کاهش گازهای گلخانه ای و رساندن آلوده ها به کمترین حد ممکن به توالی فزون می یابد همچنین نیاز به یک سیستم چند منظوره برای کاهش هزینه ها و کارایی بالا به مراتب روز به روز بر اهمیت آن افزوده می شود .

۱-۵ فرضیه های تحقیق

۱. دمای کاتد و آند براساس مرجع خروجی ها قرار داده شده است.
۲. عملکرد حالت ماندگار برای همه اجزاء در نظر گرفته می شود. این بدین معنی است که تجمع انرژی و جرم در کل سیستم از طریق زمان وجود ندارد. علاوه بر این در مورد سینتیک الکتروود ، حالت پایدار خلل و فرج الکتروود وجود ندارد و محصولات از واکنش انتقال به داخل و خارج از الکتروودها در همان زمان در واکنش اتفاق می افتد.
۳. گاز طبیعی متان و اتان خالص فرض می شود.
۴. حرارت به محیط اطراف از بهساز ، پشته سلول سوختی و مشعل تلف نمی شود.
۵. مبدل حرارتی ، مخلوط کن و کمپرسور و توربین آدیاباتیک می باشد. از این رو هیچ انتقال حرارت بین این سیستم و محیط اطراف وجود ندارد.

۱-۶ تعریف پیل سوختی

پیل سوختی یک وسیله الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند و از الکترولیت ، الکتروود آند و الکتروود کاتد تشکیل شده است. پیل های سوختی یک مبدل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی هستند که امروزه به عنوان یک فناوری جدید در تولید انرژی محسوب میشوند (۱) عملکرد پیل سوختی مانند باتری نیست که انرژی را ذخیره کند بلکه پیل سوختی حالتی از انرژی به حالت دیگر تبدیل می کند، به طوری که در این تبدیل مواد داخل پیل مصرف نمی شوند . گاز هیدروژن به دلیل تمایل واکنش دهنده گی بالا، فراوانی و عدم آلاینده گی محیط زیست، به عنوان سوخت ایده آل در پیل سوختی مورد استفاده قرار می گیرد.

پیل های سوختی اکسید جامد در آینده از پر کاربردترین سیستم ها خواهد بود. راندمان بالا و آلودگی هوای آن نسبت به سیستم هایی با سوخت های فسیلی پایین تر بوده است.

پیل های سوختی اکسید جامد یکی از انواع سلول های با کارکرد دما بالا می باشد. که یکی از بیش ترین تکنولوژی ها با بازده بالا و با محصولات انرژی پاک در واحد های کوچک و نیروگاههای قدرت در مقیاس بزرگ می باشد . سلول سوختی یک واحد تبدیل انرژی است که یک سوخت گازی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. و توسط ترکیبی از الکتروشیمیایی با اکسید کننده گرم می شود.

این تکنولوژی انعطاف پذیر بوده و مدولار بودن را ارایه می دهد به طور معمول سلول سوختی متشکل از سه بخش آند کاتد و الکترولیت می باشد. بین آند یک سلول و کاتد سلول بعدی یک صفحه اتصال همیشه برای ارایه تماس الکترونیکی نصب شده است. سلول سوختی اکسید جامد یک نوع سلول سوختی است که یکی از مهم ترین آنها به حساب می آید. سلول سوختی اکسید جامد از لحاظ دمای عملیات و مدیریت سوخت بسیار مورد توجه بوده است. پیل سوختی اکسید جامد دارای مزایای متعددی نسبت به سایر سلول های سوختی می باشد بعنوان مثال چندین مورد در مواد سرامیکی خود از قبیل پایداری در شرایط اکسیداسیون و کاهش آن و سازگاری شیمیایی با سرامیک های مختلف استفاده شده در دمای بالا و هدایت پذیری یونی غشا دمای کاری بالایی دارد.

۱-۷ ساختمان پیل سوختی

هر پیل سوختی از سه جزء اصلی تشکیل شده است: الکتروود آند، الکتروود کاتد و الکترولیت یا غشاء گاز هیدروژن که به عنوان سوخت به کار می رود، به الکتروود آند وارد شده و در آن جا با از دست دادن الکترون، اکسایش می یابد. طی این واکنش یون هیدروژن مثبت و الکترون تولید می شوند. یون های هیدروژن به همراه الکترون ها از کاتد به آند انتقال می یابند. انتقال یون های هیدروژن از طریق الکترولیت و انتقال الکترون از طریق یک مدار خارجی صورت می گیرد.

۱-۷-۱ اجزای ساختمان پیل سوختی

- آند (الکتروود سوخت):

اکسیداسیون سوخت.

ایجاد سطح مشترک برای سوخت و محلول الکترولیت.

هدایت الکترون ها از محل واکنش به سمت مدار خارجی.

- کاتد (الکتروود اکسیژن):

احیاء اکسیژن.

ایجاد سطح مشترک برای اکسیژن و الکترولیت.

هدایت الکترون ها را از مدار خارجی به سمت کاتد.

کاتد بعنوان یک جداساز متغیر برای اکسیژن طراحی شده است با این حال ثابت شده است که محاسبه آن در هایسیس دشوار است. و به جای آن با ۱۰۰٪ اکسیژن جداکننده همراه با یک اسپیلتر جریان است که

نسبت اکسیژن ارسال شده به الکترولیت با اکسیژن باقی مانده مخلوط با گاز خروجی کاتد می باشد. (کاتد برای جداسازی اکسیژن طراحی و مدل شده است).

انرژی در جهان در حال رشد است و اثرات زیست محیطی به استفاده از سیستم های تولید برق برای کاهش آلاینده یکی از موضوعات جذاب برای پژوهشگران است. در یک ترکیب سه گانه محصولات تولید (برق و گرمایش و سرمایش) براساس کیفیت های مختلف هستند. پیل سوختی اکسید جامد در دماهای بالاتر دارای اتلاف انرژی بیش تری است که میتواند با سیکل یکپارچه موثر واقع شود.

-الکتروُد:

الکتروُد متشکل از ۲ قسمت از جمله آند و کاتد می باشد. جزییات هریک در زیر آمده است:

فعالیت کاتالیزوری-الکترونیکی .

پایداری و سازگاری شیمیایی مورفولوژیکی بالا بدون غلتک .

قیمت پایین .

سازگاری مکانیکی با سایر مواد مانند الکترولیت و اتصالات.

عدم تقارن حرارتی ممکن است سبب شکستن سلول شود.

آند:

مواد آندی باید سازگار باشند. (گسترش شیمیایی و حرارتی)

خواص کاتالیزوری آند برای اکسیداسیون سوخت مهم است

-الکتروَلیت :

الکتروَلیت یون هدایت شده سرامیکی یک ترکیب در پیل سوختی اکسید جامد است. که ممکن است. یون هیدروژن یا یون اکسیژن حمل کند. با این حال خواص مورد استفاده به عنوان پیل سوختی اکسید جامد وجود دارد.

انتقال یکی از انواع یون های ایجاد شده در واکنش الکترودها .

جلوگیری از عبور الکترونها .

وظیفه جداسازی گاز .

۱-۷-۲ عملکرد ساختمان پیل سوختی

هیدروژن به سمت آند هدایت می شود و با از دست دادن الکترون به پروتون تبدیل می شود. در کاتد هوا دمیده می شود تا اکسیژن مورد نیاز مهیا شود. اکسیژن الکترون ها را از کاتد می گیرد و به یون تبدیل می شود و در الکتروولیت باقی می ماند.

ماده سرامیکی به کار رفته به یون های اکسیژن اجازه می دهد تا از میان آن عبور کنند. پروتون با یون اکسیژن ترکیب می شود و آب تولید می کند و از طرف آند خارج می شوند. الکترون های تولید شده در این واکنش اکسایش-کاهش باعث ایجاد یک اختلاف پتانسیل در دو سر پیل می شوند. (مدار خارجی)

۱-۸ مزایای پیل سوختی

مزایای پیل های سوختی بطور کلی عبارتند از:

- پیل سوختی آلودگی ناشی از سوزاندن سوخت های فسیلی را حذف نموده و تنها محصول جانبی آن آب می باشد.

- در صورتی که هیدروژن مصرفی حاصل از الکترولیز آب باشد نشر گازهای گلخانه ای به صفر می رسد. -بدلیل وابسته نبودن به سوخت های فسیلی متداول نظیر بنزین و نفت، وابستگی اقتصادی کشورهای ناپایدار اقتصادی را حذف می کند.

- با نصب پیل های سوختی نیروگاهی کوچک، شبکه غیرمتمرکز نیرو گسترده می گردد.

- پیل های سوختی راندمان بالاتری نسبت به سوخت های فسیلی متداول نظیر نفت و بنزین دارد.

- هیدروژن در هر مکانی از آب و برق تولید می گردد. لذا پتانسیل تولید سوخت، غیرمتمرکز خواهد شد.

- اکثر پیل های سوختی در مقایسه با موتورهای متداول بسیار بی صدا هست .

- انتقال گرما از پیل های دما پایین بسیار کم می باشد لذا آنها را برای کاربردهای نظامی مناسب خواهد شد.

- زمان عملکرد آنها از باتری های متداول بسیار طولانی تر است. فقط با دو برابر نمودن سوخت مصرفی می

توان زمان عملکرد را دو برابر نمود و نیازی به دو برابر کردن خود پیل نمی باشد.

- سوخت گیری مجدد پیل های سوختی به راحتی امکان پذیر می باشد و هیچ گونه اثرات حافظه ای بر جای نمی گذارد.

- به علت عدم وجود اجزای متحرک نگهداری از آنها بسیار ساده می باشد.

- نصب و بهره برداری از پیل های سوختی بسیار ساده و مقرون به صرفه می باشد.

- پیل های سوختی مدولار می باشند یعنی به راحتی توان تولیدی از آنها قابل افزایش می باشد.
- این مولدها قابلیت تولید همزمان برق و حرارت را دارند.
- امکان استفاده از سوخت های تجدیدپذیر و سوخت های فسیلی پاک در آنها وجود دارد.
- به میکروتوربین ها متصل می گردند.
- پیل سوختی به تغییر بار الکتریکی پاسخ می دهد.
- پیل سوختی امکان تولید برق مستقیم با کیفیت بالا را دارد.
- دانشیته نیروی بالا دارد.
- میزان بازدهی آن ها نسبت به سلول های دیگر بیش تر است.

۹-۱ معایب پیل سوختی

به مواد بیشتر و فرایندهای سریعتری نسبت به دیگر پیل ها نیاز دارد. ممکن است در مدت طولانی کار، گرما مشکلاتی چون ناسازگاری عناصر و افت انرژی را موجب شود. در صورت استفاده از سوخت ناخالص، کار و گرمای بیش از حد موجب رسوب کربن و در نهایت مسمومیت پیل می گردد.

۱۰-۱ کاربرد پیل های سوختی

-کاربردهای صنعتی - تجاری - آزمایشگاهی - نظامی - فضایی و حمل و نقل و غیره .

نکته: تولید برق محلی (غیر متمرکز)

- استفاده از گرمای تولیدی جهت گرمایش و تولید بخار آب
- کاهش نیاز به گسترش شبکه توزیع برق

-حمل و نقل

-خودروهای کوچک و پایانه های اتوبوس رانی

-پرتابل

-وسایل در محدوده توانی ۱۵ الی ۱۰۰۰ وات،

مانند تلفن های همراه، لپ تاپها

-تجهیزات نظامی .

-سیستم پیل سوختی

-بخش سوخت رسانی:

-مبدل سوخت

-سیستم ذخیره هیدروژن

-بخش تولید انرژی.

-سری پیل سوختی .

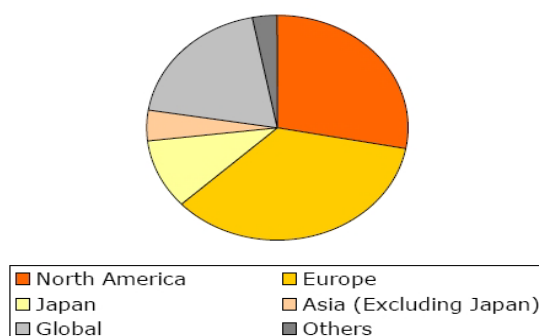
-سیستم کنترل رطوبت ، فشار، دما و دبی گازها .

۱-۱۱ بخش تبدیل انرژی

فصل مشترک پیل سوختی و مصرف کننده برق (جهت تبدیل جریان و ولتاژ برق به ولتاژ و جریان مناسب مصرفی)

۱-۱۱-۱ توسعه پیل های سوختی در جهان

از نظر فعالیت بر روی پیل سوختی اکسید جامد قاره اروپا با حدود ۳۵ درصد بیشترین سهم را به خود اختصاص داده است. آمریکا شمالی مقام دوم را دارد. همانطور که در شکل دیده می شود، حدود ۱۹ درصد فعالیت ها مربوط به کمپانی ها هستند که اعتقاد دارند که تجارتشان جهانی است و به کشور خاصی محدود نیست. یافته ها نشان می دهد که حدود یک سوم فعالیتها در زمینه تحقیق و توسعه است. حدود ۴۲ درصد آنها، به عنوان تجاری شدن به آن می نگرند. در مقایسه با PEM که حدود ۷۵ درصد از فعالیتها بر روی تجاری شدن است.



SOFC Activity by Geographical Split. Data is based on a discrete sample of companies listed in the FCT Industry Directory.

شکل ۱-۱ فعالیت SOFC با تقسیم جغرافیایی. اطلاعات مبتنی بر شرکت های فهرست شده در فهرست صنایع FCT (۱)

۱-۱۱-۲ توسعه در آمریکا

شرکت های آمریکایی بر روی توسعه سیستم های پیل های سوختی اکسید جامد صفحه ای به ظرفیت ۳ تا ۱۰ کیلووات که قابلیت ترکیبی تا ظرفیت مگا وات را داشته باشد، با هزینه ۴۰۰ دلار به ازای هر کیلووات گذاشته اند. جدول ۱-۱، اهداف برنامه فوق را نشان می دهد.

جدول ۱-۱ زمان سنجی و فازهای برخی مواد سوختی بین سال های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ (۱)

Phases & Timing	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
DOE SECA (NG, LP Fuels)	PHASE I Technology Development Cost Target \$800/kW				PHASE II Design & Development Cost Target \$600/kW			PHASE III Product Development Cost Target \$400/kW		

اکومتریس^۳

این کمپانی بر روی ساخت پیل سوختی اکسید جامد لوله ای با کاربرد UPS و سیستم های CHP کار می کند. محصولات این شرکت را می توان به ساخت سیستم های ۵ و ۱۰ کیلووات اشاره نمود.

مدیریت تکنولوژی^۴

این شرکت از سال ۱۹۹۰ بر روی توسعه و ساخت سیستم های مختلف پیل سوختی اکسید جامد مشغول است. این شرکت تاکنون موفق به ساخت و توسعه استک های ۱ و ۳ کیلوواتی که با سوختهایی نظیر پروپان، گاز طبیعی، اتانول، بیوگاز، گازوئیل و روغن گیاهی کار می کنند، شده است.

دستگاه های مزوسکوپی^۵

این شرکت به ساخت سیستم تولید توان زیر ۱ کیلووات پیل سوختی اکسید جامد برای کاربردهای متحرک مشغول است.

زدتک^۶

این شرکت در سال ۱۹۸۴ و با هدف پیشرفت و توسعه سیستمهای پیل سوختی اکسید جامد تاسیس شد. زدتک کارهای گسترده ای را برای توسعه و ساخت سیستم های هیبرید پیل سوختی اکسید جامد توسعه و

^۳ Acumentrics

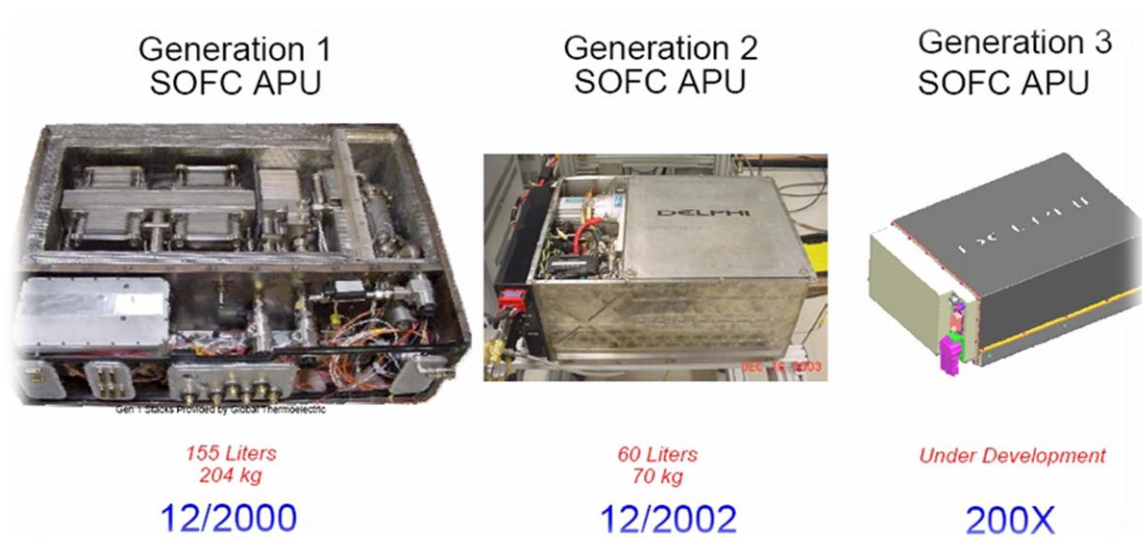
^۴ Technology Management, Inc. (TMI)

^۵ Mesoscopic Devices

^۶ Ztec

ساخت یک سیستم ترکیبی ۲۵ کیلووات با چیلر جذبی، از جمله کارهای این شرکت است. این شرکت اخیراً بر روی توسعه و ساخت یک سیستم هیبرید ۲۰۰ کیلووات با توربین گاز کار می‌کند. دلفی^۷

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



شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از پیل سوختی با ژنراتورهای مختلف (۱)

۱۱-۳ توسعه در اروپا

زیمنس-وستینگهاوس^۸

زیمنس-وستینگهاوس سیستم ۱۰۰ کیلوواتی خود را با ۱۱۵۲ سل لوله‌ای (قطر ۲/۲ سانتی متر و طول مفید ۱۵ سانتی متر) در ۱۲ ردیف ساخته است. این سیستم در هلند به مدت ۲ سال با گاز طبیعی و با بازده ۴۷ درصد کار کرد. این سیستم همچنین برای تولید تقریباً ۸۵ کیلووات آب داغ جهت استفاده سیستم گرمایش محلی به کار رفت و قابلیت ترکیب با توربین گاز را نیز دارد. سیستم ترکیبی توربین گاز پیل

Delphi^۷

Siemens-Westinghouse^۸

سوختی اکسید جامد دارای بازده ای در حدود ۷۰ درصد می باشد. (استک پیل سوختی اکسید جامد حدود ۲۰۰ کیلووات و توربین گاز حدود ۵۰ کیلووات) برق تولید کرده است.

رولز-رویس^۹

به توسعه استک های نوع صفحه ای مشغول است. این موسسه در سال ۲۰۰۵ استک تحت فشار ۶/۱۳ کیلووات را ساخت. همچنین در سال ۲۰۰۶ واحد ۸۰ کیلوواتی با فشار ۷ بار را تولید نمود. هم اکنون مشغول کار بر روی سیستم ترکیبی ۱ مگاواتی است. یکی دیگر از کشورهای با سابقه در زمینه پیل سوختی اکسید جامد، روسیه است. آنها نمونه ۱ کیلووات نوع لوله ای در سال ۱۹۸۹ ساختند. سل ها دارای چگالی توان ۰/۲ وات بر سانتی متر مربع بوده و در دمای ۹۰۰ درجه کار می کردند.

۱-۱۱-۴ توسعه در آسیا

در آسیا سه کشور، ژاپن، استرالیا و کره جنوبی به صورت عمده بر روی پیل سوختی اکسید جامد کار می کنند. شرکتهای توکیو گازو شرکت جی پاور ژاپن، از سال ۱۹۸۹ با همکاری شرکت میتسوبیشی با تحقیق بر روی ساخت SOFC نوع صفحه ای کار خود شروع کردند. شرکت توکیو گاز ساخت استک ۳ کیلوواتی صفحه ای را با موفقیت انجام داده است. یکی دیگر از موسسات فعال در زمینه پیل سوختی اکسید جامد، شرکت استرالیایی از سال ۱۹۹۲ در زمینه پیل سوختی اکسید جامد فعالیت می کند. عمده فعالیت این شرکت در زمینه ساخت پیل های سوختی اکسید جامد صفحه ای (هم الکترولیت پایه و هم آند پایه) است.

۱-۱۲ انواع پیل سوختی

۱-۱۲-۱ انواع پیل سوختی و کاربردهای آن

به طور کلی دو دسته پیل سوختی آلی و پیل سوختی فلزی تقسیم بندی می شوند. پیل های سوختی در انواع زیر موجود می باشند:

۱- پیل سوختی الکترولیت پلیمر یا غشاء مبادله کننده پروتون (PEMFC)

۲- پیل سوختی قلیایی (AFC)

۳- پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)

۴- پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)

۵- پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

۶- پیل سوختی میکروبی (MFC)

۷- پیل سوختی اسید فرمیک (FFC)

۸- پیل سوختی هوا-روی (Zn-Air FC)

۹- پیل سوختی سرامیکی

لازم به ذکر است که پیل سوختی متانول مستقیم از خانواده پیل سوختی غشاء مبادله کننده پروتون است. پیل‌های سوختی بر اساس دمای عملکرد، دارای دامنه دمایی ۸۰ تا ۱۰۰۰ برای پیل سوختی اکسید جامد می‌باشند. پیل‌های سوختی دمای پایین (AFC, PAFC, PEMFC) دارای حامل‌های یونی H^+ و یا OH^- هستند که انتقال یون از میان الکترولیت و انتقال الکترون‌ها از طریق مدار خارجی را به عهده دارند، و در پیل‌های سوختی دمای بالا مانند الکترولیت کربنات مذاب و الکترولیت اکسید جامد، جریان الکتریکی به ترتیب از طریق یون‌های CO_3^{2-} و O^{2-} -انتقال می‌یابد. در پیل‌های سوختی اکسید جامد یا سرامیکی رسانش یون در الکترولیت معمولاً در دمای بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود. خلاصه‌ای از خصوصیات هر کدام از انواع پیل‌های سوختی و جدول خصوصیات آنها بشرح ذیل می‌باشد:

پیل سوختی فلزی

-پیل سوختی فلز- هوا:

-کاتد: الکترودفوذی

-آند: فلز (سوخت)

تبدیل اکسیژن به یون‌های هیدروکسیل و آب در کاتد

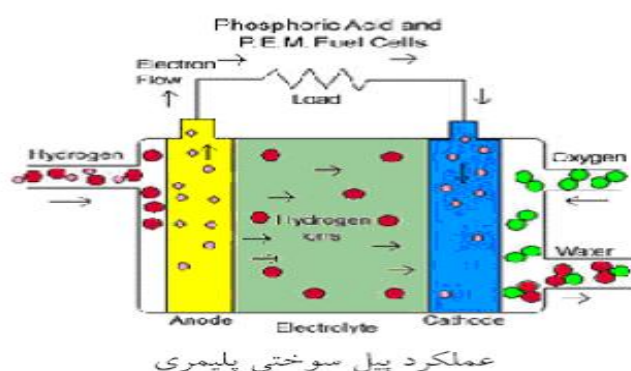
-عبور یون‌های هیدروکسیل از الکترولیت و رسیدن به آند.

-واکنش یون‌های هیدروکسیل با فلز و تشکیل اکسید فلز.

-آزاد شدن الکترون‌ها و تولید پتانسیل الکتریکی.

پیل سوختی غشاء پروتون (PEMFC)

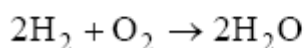
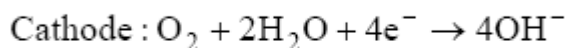
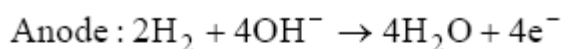
پیل‌های سوختی غشاء پروتون دارای غشاء پلیمری جامد هستند که در حال حاضر عمدتاً غشاء نفیون در این پیل سوختی بکار برده میشود و به شکل یک ورقه باریک منعطف است. این غشاء کوچک و سبک بوده و در دمای پایین کار می‌کند (دمای کارکرد بهینه در حدود ۸۵ درجه سانتیگراد است). سایر الکترولیتها جامد در دمای بالا کار می‌کنند. شکل زیر یک الکترولیت غشاء پروتون را به ما نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳ شماتیک پیل سوختی غشاء پروتون

برای سرعت بخشیدن به واکنش، یک کاتالیست پلوتونیومی در دو سطح غشاء الکترولیت استفاده می‌شود. در این پیل اتمهای هیدروژن در آند یونیزه می‌شوند و الکتردهای آنها جدا می‌شود. یونهای هیدروژن که شامل بار مثبت هستند، به سطح غشاء خخل دار نفوذ می‌کنند و بسمت کاتد می‌روند؛ الکتردهای جدا شده نمی‌توانند از این غشاء عبور کنند و از یک مدار خارجی عبور می‌کنند و موجب تولید برق می‌شوند. در کاتد الکتردها، پروتونهای هیدروژن و اکسیژن موجود در هوا با هم ترکیب می‌شوند و آب را تشکیل می‌دهند. پیل سوختی PEM نیازمند هیدروژن خالص است؛ بنابراین باید از یک رفورمر در خارج از پیل سوختی استفاده کنیم تا احتمال بوجود آمدن کربن مونوکسید و در نتیجه مسمومیت کاتالیست را کاهش دهیم.

واکنشهای انجام شده در آند و کاتد بشرح ذیل است :



مزایا:

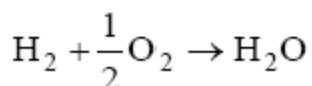
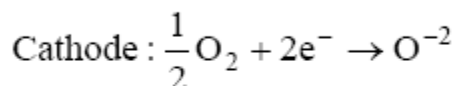
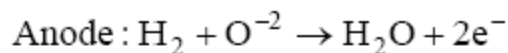
- دمای پایین و شروع به کار سریع.
- عدم حساسیت به دی اکسیدکربن.
- امکان استفاده از گازهای مشتق از هیدروکربن بعنوان سوخت.

معایب:

- حساسیت به مونواکسید کربن.
- به کارگیری فلزات کمیاب در ساختمان پیل.
- پیچیده بودن سیستم مدیریت آب در مجموعه غشاء و الکتروود.

پیل سوختی قلیایی (AFC)

پیل سوختی قلیایی با هیدروژن و اکسیژن خالص کار می کند و از محلول هیدروکسید پتاسیم در آب بعنوان الکترولیت استفاده می کنند و الکتروود آند آن از جنس نیکل و الکتروود کاتد آن از جنس اکسید نیکل لیتیومی شده می باشد .درجه حرارت کارکرد این پیل پایین بوده و بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد می باشد . در این پیل سوختی یونها هیدروکسیل از سمت کاتد به آند رفته و در آند گاز هیدروژن با یونهای هیدروکسیل واکنش داده و آب و الکترون را ایجاد می کند الکترونهای بوجود آمده در آند توسط مدار خارجی ، توان الکتریکی تولید می کند و از طریق این مدار خارجی، الکترونها به کاتد باز می گردد.



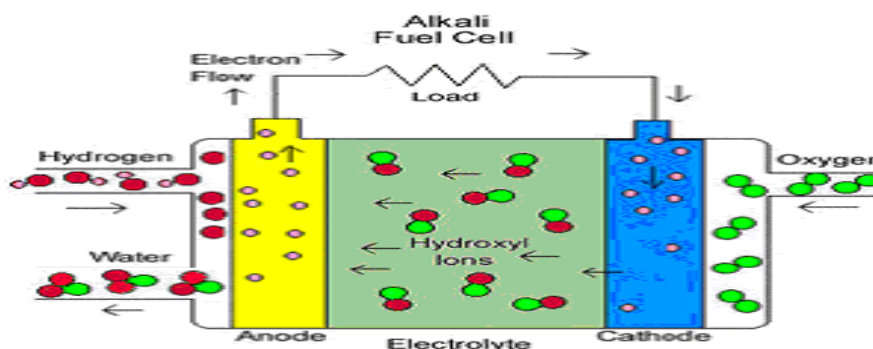
مزایا:

-عدم نیاز به فلزات کمیاب

-بالا بودن راندمان

معایب:

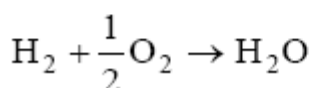
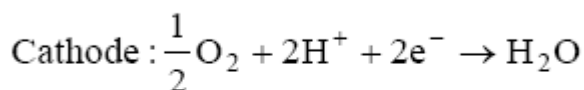
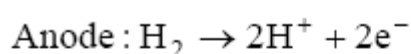
حساسیت شدید به دی اکسید کربن لزوم استفاده از هیدروژن خالص پیل سوختی قلیایی از میزان آلودگی کمی برخوردار است و بخاطر احتمال واکنشهای ناخواسته در این پیل نیاز به هیدروژن خالص شده داریم و در صورتی که هیدروژن خالص نباشد موجب واکنشهای شیمیایی اضافی و ایجاد کربنات جامد می شود که این ماده در واکنشهای پیل سوختی اختلال ایجاد می کند. مشکل دیگر پیل سوختی قلیایی میزان زیاد پلوتونیم است که بعنوان کاتالیست از آن استفاده می شود. اینکاتالیست قیمت زیادی دارد و پیل سوختی قلیایی را برای کاربردهای عادی نامناسب می کند و از آنجایی که احتمال نشت الکترولیت مایع نیز ممکن است؛ بنابراین برای کاربردهای حمل و نقلی مناسب نیست. عملکرد یک پیل سوختی قلیایی را در شکل می بینید.



شکل ۱-۴ شماتیک پیل سوختی قلیایی

پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)

پیل سوختی اسید فسفریک در دمای حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد کار می کند و از الکترولیت اسید فسفریک استفاده می کند و الکترودهای پیلهای سوختی اسید فسفریک از جنس پلاتین می باشد که بر روی سطح پودر کربن فعال نشانده شده است. در این نوع پیل سوختی از سوختهای بیشتری می توان استفاده کرد. عملکرد پیل سوختی اسید فسفریک به این ترتیب است که یونهای هیدروژن مثبت توسط الکترود از آند به کاتد می روند و الکترونهای بوجود آمده در آند از طریق یک مدار خارجی عبور میکند و برق تولید می کند و به کاتد برمی گردد. واکنشهای انجام شده در این پیل عبارتست از:

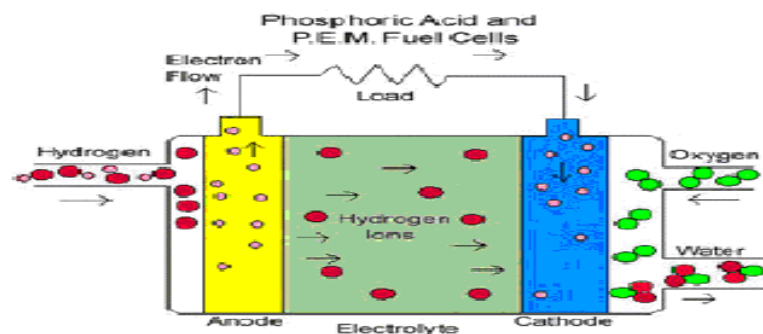


مزایا:

- توان تحمل ۱ تا ۲ درصد مونواکسید کربن.
- امکان استفاده در مولدهای (تولید همزمان برق و حرارت).
- ثبات الکترولیت در محیط الکتروشیمیایی.
- سادگی سیستم مدیریت آب و دما.

معایب:

- کم بودن سرعت احیاء اکسیژن.
- حساسیت به سولفور.

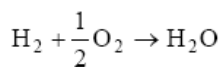
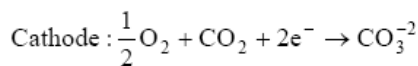
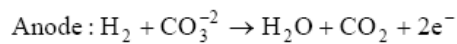


شکل ۵-۱ شماتیک پیل سوختی اسید فسفریک

در کاتد الکترونها، یونهای هیدروژن و اکسیژن آب بوجود می آورند که با فشار به بیرون پیل سوختی هدایت می شود. با وجود کاتالیست پلوتنیم سرعت واکنشها بالا می رود. از مزایای پیل سوختی اسید فسفریکی می توان به توان تحمل پیل سوختی در قبال میزان کمی از مونوکسید کربن و همین طور توانایی تحمل دمای بالای دمای جوش آب را دارد. این پیل سوختی اجزایی با مقاومت بالا باید داشته باشد تا در مقابل خوردندگی اسید مقاومت کند. هیدروژن مورد نیاز برای PAFC می تواند یک رفرمر خارجی از یک سوخت هیدروکربنی بوجود بیاید در صورتی که سوخت مورد نظر گازوئیل باشد، سولفور آن باید جدا شود. زیراسولفور به کاتالیست الکترودها صدمه می زند. می توان از گرمای بوجود آمده در PAFC هادر کاربرد ترکیبی گرما و برق استفاده کرد. عملکرد یک پیل سوختی اسید فسفریک را در شکل می بینید.

پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)

در پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) الکترولیت ترکیب ۳۲٪ درصد کربنات پتاسیم و ۶۸٪ درصد کربنات لیتیم می باشد. الکتروکاتد آن از جنس اکسید نیکل لیتیمی شده و الکتروکاتد آن از جنس آلیاژ نیکل کروم (۲ تا ۱۰ درصد کروم) است. درجه حرارت کارکرد ۶۵۰ درجه سانتیگراد و جزء پیلهای سوختی با دمای کارکرد بالا بشمار می آید. در آند، هیدروژن با این یونها واکنش می دهد و دی اکسید کربن آب و الکترون تشکیل می دهد. الکترونها توسط یک مدار خارجی از آند به کاتد منتقل می شود و برق تولید می کند. اکسیژن هوا، دی اکسید کربن بازیافت شده از آند با الکترونها واکنش داده و یونهای (کربنات) را به وجود می آورد و الکترولیت را سرشار از یونها CO_3^{2-} می کند.



مزایا:

- امکان بکارگیری در مولدهای دو منظوره

- عدم استفاده از کاتالیست گران قیمت

- راندمان بالا

معایب:

- حساسیت زیاد به سولفور

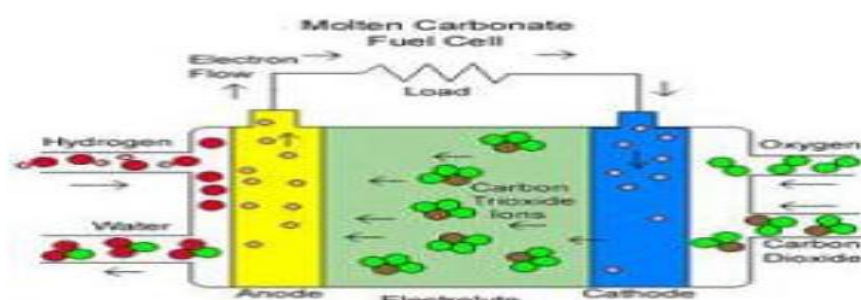
- حل شدن اکسید نیکل

- احتیاج به چرخه دی اکسید کربن

پیل سوختی کربنات مذاب، (MCFC) دما بالا می توانند هیدروژن را از سوختهای مختلف توسط رفورمر

داخلی یا خارجی استخراج کند؛ بعلاوه حساسیت کمتری نسبت به مسمومیت مونوکسیدکربن دارند.

از گرمای خروجی پیل سوختی می توان برای کارهای صنعتی استفاده نمود.



شکل ۱-۶ شماتیک پیل سوختی کربنات مذاب

پیل سوختی کربنات در مقایسه با پیل سوختی اکسید جامد دارای دو مشکل است؛ یکی از این مشکلات

پیچیدگی کار با الکترولیت مایع است و دومین مشکل باقیمانده های واکنش شیمیایی در پیل سوختی کربنات

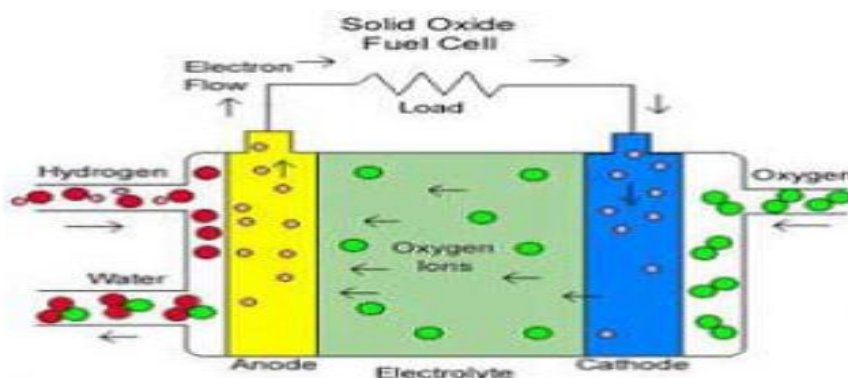
مذاب است . یونهای کربنات الکترولیت در واکنشهای آند استفاده می شوند؛ بنابراین نیاز داریم که توسط تزریق دی اکسید کربن در کاتد، این مقدار را جبران کنیم.

پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) از یک الکترولیت سرامیکی (ترکیبی از زیرکنا (Zr) وایتیریا (Y)) با فرمول $\text{O}_{0.08}\text{Y}_{0.92}\text{Zr}$ می باشد به جای یک الکترولیت مایع استفاده می کند .الکتروود آند ملغمه ای از نیکلوزیرکنا و الکتروود کاتد از جنس منگنیت لانتانیم است . درجه حرارت کارکرد پیل ۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد می باشد . الکترولیت جامد با الکتروودها که از مواد متخلخل مخصوصی تشکیل شده اند، پوشانده شده اند . در دمای بالای عملکرد پیل سوختی SOFC ، یونهای اکسیژن (با بار منفی) از شبکه کریستالی عبور می کند . وقتی یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آند عبور کند، یک جریان شارژ شده منفی شامل یونهای اکسیژن از الکترولیت عبور می کند تا سوخت را اکسید کنند . اکسیژن ذخیره شده در کاتد معمولاً از هوا گرفته می شود . الکترونهای ایجاد شده در آند از یک بار خارجی (مدار خارجی) عبور کرده و به کاتد می رود .

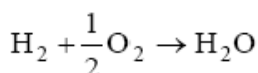
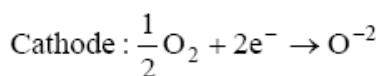
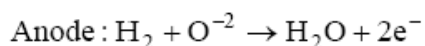
با این کار یک مدار الکتریکی کامل می شود و انرژی برق تولید می شود . پیلهای سوختی نوع اکسید جامد SOFC نیاز به رفورمر خارجی ندارند .

عملکرد کلی پیل سوختی اکسید جامد را می توان در شکل زیر دید



شکل ۷-۱ شماتیک پیل سوختی اکسید جامد

واکنشهای انجام شده در آند و کاتد بصورت زیر می باشد:



مزایا:

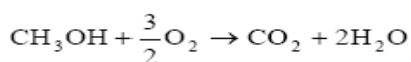
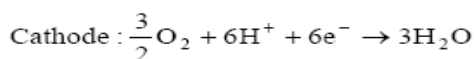
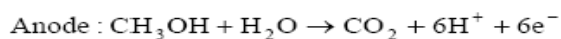
- عدم حساسیت به مونواکسیدکربن
- قابلیت مصرف سوختهای گوناگون
- عدم نیاز به هیدروژن خالص
- بالا بودن راندمان سیستم
- عدم نیاز به سوخت مجزا
- امکان استفاده مستقیم از گاز طبیعی بعنوان سوخت
- قابل استفاده در مولدهای دو منظوره
- عدم استفاده از الکترولیت مایع
- عدم استفاده از فلزات گران قیمت و کمیاب در ساخت

معایب:

- طولانی بودن زمان شروع به کار
- تشدید خوردگی و خرابی اجزاء بعلت کارکرد در دمای بالا
- گران قیمت بودن بعضی از اجزاء

پیل سوختی متانولی (DMFC)

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 می کند و دمای کارکرد آن بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد است. واکنشهای انجام شده در الکترودهای این پیل سوختی عبارتند از:



مزایا:

- قابلیت استفاده از متانول مایع بعنوان سوخت.
- چگالی قدرت بالا.
- دما و فشار عملکردی پایین.
- سادگی ساختار و مدیریت حرارت پیل.
- ضریب اطمینان بالای سیستم.
- حذف سیستم مبدل سوخت.
- حذف سیستم پیچیده مدیریت آب و حرارت (بعلت همراه بودن سوخت با آب).
- کاهش قابل ملاحظه وزن و حجم.

معایب:

- عبور متانول از غشاء و در نتیجه افت ولتاژ کلی پیل و به هدر رفتن سوخت.
- پایین بودن عملکرد در مقایسه با دیگر پیل ها.
- استفاده از پلاتین در ساختار پیل.
- پایین بودن فعالیت کاتالیست Pt-Ru در آند.

۱-۱۳ زمینه‌های مختلف استفاده از پیل‌های سوختی

۱. حمل و نقل (خودروهای سواری و وسایط نقلیه عمومی): چند نمونه اتوبوس هیدروژنی تولید شرکت بالارد از سال ۲۰۰۷ در ویسلر کانادا مورد استفاده قرار گرفته اند. اولین مدل تجاری خودرو پیل سوختی توسط هیوندای در سال ۲۰۱۵ به بازار عرضه شده است. سایر شرکت های عمده خودروسازی نیز نخستین مدل های خودرو هیدروژنی خود را در سالهای ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ به بازار عرضه خواهند کرد.
۲. نیروگاه‌ها (نیروگاه‌های متمرکز و غیرمتمرکز اعم از خانگی، تجاری، صنعتی): پیل های سوختی به دلیل آرام و بی صدا بودن برای تولید برق محله ای گزینه خوبی محسوب می شود. به علاوه کاهش نیاز به

گسترش شبکه توزیع برق، از گرمای تولیدی از این نیروگاه‌ها می‌توان برای گرمایش و تولید بخار آب استفاده نمود.

۳. وسایل الکترونیکی قابل حمل (تلفن‌های همراه، رایانه‌های شخصی و ...)

۴. صنایع نظامی: پیل‌های سوختی که در دمای پایین کار می‌کنند در تانک‌ها، زره‌پوش و خودروهای نظامی استفاده می‌شوند. نداشتن قطعه متحرک در این نوع پیل‌های سوختی باعث کاهش صدا شده و به دلیل کارکرد در حرارت پایین ردیابی آنها مشکل‌تر از خودروهایی با موتور درون سوز می‌باشد.

۱-۱۴ به روز ترین روش تولید پیل سوختی

در حال حاضر، پیل‌های سوختی، شبیه به خودروها تولید می‌شوند؛ یعنی قطعات مختلف آنها به صورت جداگانه ساخته و سپس روی هم سنبل می‌شوند تا یک پیل سوختی تولید شود. این روند تولید، مراحل بسیار زیادی دارد و در عین هزینه بالای آن، زمان بسیار زیادی صرف تولید آن می‌شود. گروه تحقیقاتی تامپسون با استفاده از فرایند پیشرفته میکروfabریکیشن، نسل جدید پیل‌های سوختی را تولید می‌کند. در این فرایند به جای تولید جداگانه پیل سوختی، آنها به صورت لایه لایه ساخته می‌شوند، روشی که هم اکنون برای ساخت ابزارهای میکروالکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. پژوهشگران دانشگاه میشیگان امیدوارند با استفاده از این فناوری ارزان قیمت و همچنین استفاده از مواد ارزان تر، قیمت پیل‌های سوختی را از ۱۰ هزار دلار برای هر کیلو وات به ۱۰۰۰ دلار برسانند.

۱-۱۵ پیل سوختی اکسید جامد

۱-۱۵-۱ مزایای پیل سوختی اکسید جامد

- به علت عملکرد دمایی بالا دارای بیشترین راندمان نسبت به سایر پیل‌های سوختی می‌باشد.
- از گرمای تولید شده می‌توان برای افزایش بازدهی مجدد استفاده نمود.
- امکان بازسازی درونی سوخت به خاطر عملکرد دمایی بالا وجود دارد.
- نیازی به کاتالیست‌های گران قیمت ندارد.
- برای استفاده از سوخت‌های مختلف نیازی به مبدل‌های سوخت نیست.
- از آنجایی که پیل سوختی اکسید جامد دارای الکترولیت جامد است مشکل خوردگی مواد کم می‌باشد.

برای ساخت اجزای پیل می‌توان از فناوری لایه نازک استفاده نمود. ولی در پیل‌های سوختی با الکترولیت مایع چنین امری دست نیافتنی است.

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 برخلاف 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، اتانول، گاز طبیعی) و حتی بنزین و گازوئیل را مورد استفاده قرار دهند. به طور کلی در سوخت‌های هیدروکربوری، هیدروژن توسط یک دستگاه اصلاح گر سوخت، از آنها جدا شده و به کار گرفته می‌شود. پیل‌های سوختی در کاهش آلودگی محیط زیست نقش به سزایی داشته و بخاطر عدم به کارگیری قطعات مکانیکی زیاد، ایجاد آلودگی صوتی نیز نمی‌نماید. علاوه بر آن سیستم پیل سوختی از کارایی نسبتاً بالایی نسبت به موتورهای احتراق درون سوز برخوردار است. بحران انرژی در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۹۱ و آلودگی فزاینده محیط زیست، کشورهای صنعتی را بر آن داشت تا جهت استفاده از سیستم‌هایی با راندمان بالا و سازگار با محیط زیست سرمایه‌گذاری کلانی نمایند. سیستم‌های پیل سوختی از جمله تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای است که مصارف غیر نظامی آن با توان‌های میلی‌وات تا مگاوات موضوع تحقیق شرکت‌های تولید نیرو، خودرو سازی و نیز شرکت‌های نفتی قرار گرفته‌است. پیل سوختی مجموعه‌ای از الکترولیت، الکترودها و صفحات دو قطبی است. در پیل سوختی (به عنوان مثال نوع الکترولیت پلیمر جامد)، هیدروژن از آند و اکسیژن از کاتد وارد می‌شوند. هیدروژن الکترون خود را در آند از دست داده و بصورت پروتون از طریق الکترولیت به سمت کاتد حرکت می‌کند. الکترون نیز از طریق مدار خارجی به سوی کاتد هدایت می‌شود. اکسیژن با دریافت الکترون و پروتون به آب تبدیل می‌شود. حرکت الکترون از آند به کاتد جریان برق را به وجود می‌آورد که قابل استفاده در وسایل برقی است. آب حاصل در کاتد می‌تواند مورد استفاده مجدد قرار گیرد.

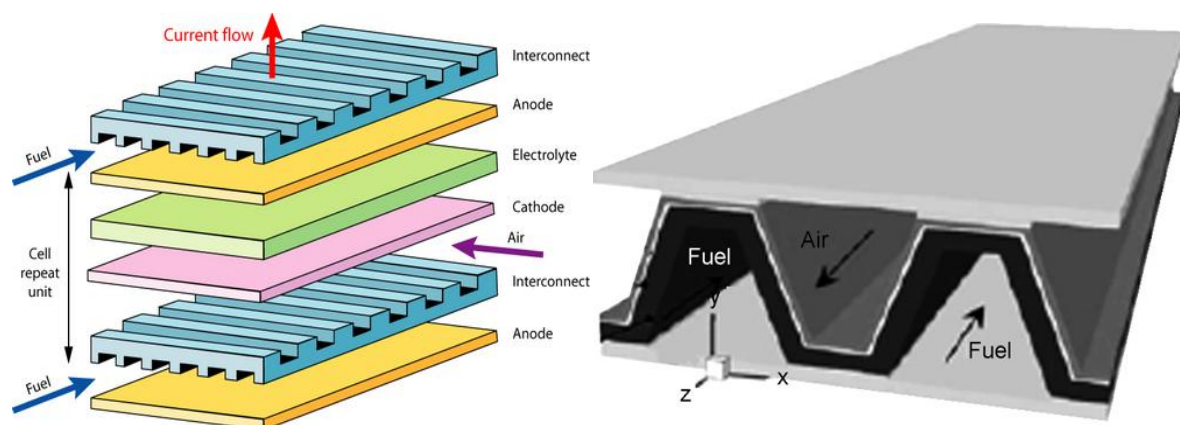
پیل سوختی یک وسیله الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و از الکترولیت، الکتروود آند و الکتروود کاتد تشکیل شده است.

۱-۱۵-۲ رایج ترین مواد مورد استفاده برای اجزاء پیل سوختی اکسید جامد

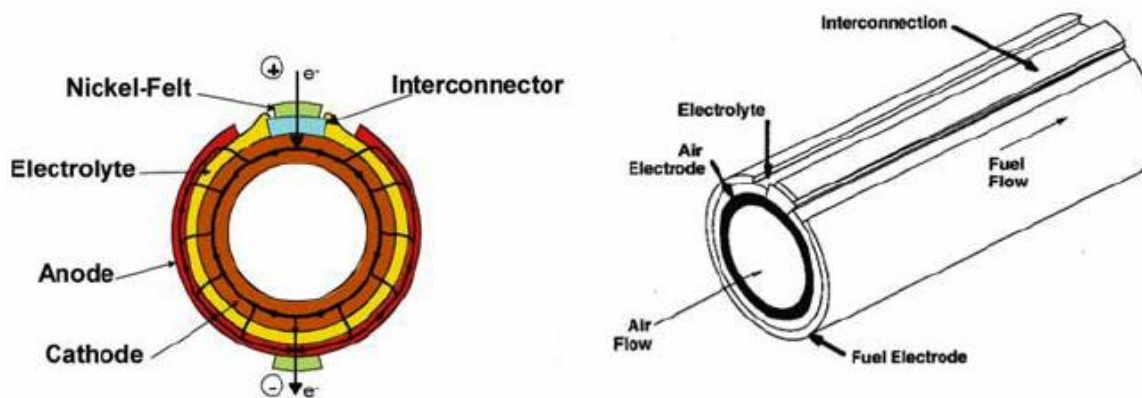
- NiO/YSZ
- YSZ (yttria-stabilized zirconia)

۱-۱۵-۳ انواع پیل سوختی اکسید جامد

از نظر ساختار سل و نوع طراحی، پیل های سوختی اکسید جامد را می توان به دو دسته عمده طراحی لوله ای و طراحی صفحه ای تقسیم بندی نمود. در طراحی لوله ای، الکترودها و الکترولیت به شکل یک لوله و یا یک جعبه قرار گرفته اند. در برخی از این طراحی ها، الکترولیت و یا یکی از الکترودها نقش پایه را دارد و در برخی دیگر لوله ای جدا این نقش را بر عهده دارد. طراحی لوله ای خود به دو دسته جریان بالا و ولتاژ بالا تقسیم می شود. ساختار لوله ای سل امکان آب بندی آسان را فراهم نموده است. در طراحی صفحه ای الکترودها و الکترولیت به صورت تخت بر روی هم قرار می گیرند. این نوع طراحی خود به دو دسته طراحی دایره ای و مستطیلی تقسیم می گردد.



شکل ۱-۸ پیل سوختی نوع صفحه ای را نشان می دهد.



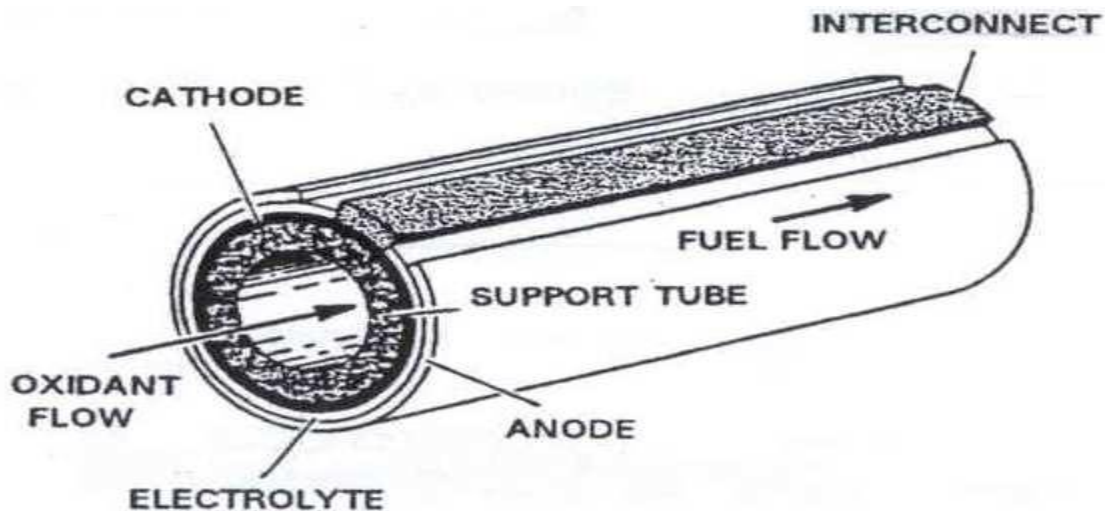
شکل ۹-۱ پیل سوختی نوع لوله ای را نشان می دهد .

چگالی توان نوع صفحه ای بیشتر از نوع لوله ای است . در طراحی لوله ای به علت مسیرهای هدایت الکتریکی طولانی تر، افت ها بیشتر بوده و ماکزیمم چگالی توان آنها محدود به ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی وات بر سانتیمتر مربع است. نوع صفحه ای به دلیل داشتن مسیرهای هدایت کوتاهتر از توان بیشتری برخوردار است. چگالی توان بالا و هزینه ساخت کمتر، سبب توجه ویژه ای به این نوع از پیل سوختی شده است . هرچند مشکل اساسی در این نوع از پیل سوختی، آب بندی است . توسعه تک سل پیل سوختی اکسید جامد به طور عمده در دو نوع لوله ای و صفحه ای انجام می گیرد. چگالی توان پایین نوع لوله ای سبب شده که از آنها تنها در کاربردهای ساکن تولید برق استفاده شود. در حالیکه از نوع صفحه ای در بسیاری از کاربردهای متحرک استفاده می شود. مطالعات نشان داده که عمده کاربردهای پیل سوختی اکسید جامد در کاربردهای ساکن کوچک شامل واحدهای ساکن مورد استفاده برای تامین برق خانگی، کاربردهای صنعتی و کاربردهای نظامی است. عمده فعالیت های صورت گرفته روی پیل سوختی اکسید جامد در حوزه تحقیق و توسعه است و موسسات بسیاری در نقاط مختلف جهان بر روی توسعه آن کار می کنند. از لحاظ میزان فعالیت قاره اروپا، بیشترین سهم را به خوداختصاص داده است.

انواع مختلف پیکربندی SOFC پیشنهاد شده است. تفاوت بین این طرح ها روش اتصال هر سلول شکل هر سلول یا جریان سوخت و اکسید کننده از طریق کانا های آنها می باشد.

۱-۱۵-۳ طرح لوله ای:

این پیکربندی توسط شرکت ویستنگهاوس در سال ۱۹۸۰ پیشنهاد شده است. شامل لوله ای که با کاتد الکترولیت و آند و اتصال دهنده متصل می شود. در شکل ۴ نشان داده شده است. سوخت از خارج تامین می شود و اکسیدان از داخل لوله تامین می شود. این طراحی دارای معایب مانند مقاومت درونی سلول و محدودیت انتشار گاز است.

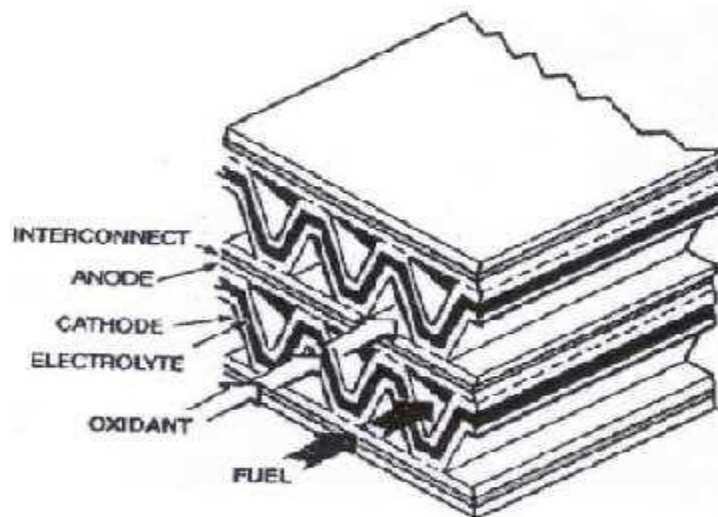


شکل ۱-۱۰ جریان ها و اجزاء پیل سوختی نوع لوله ای

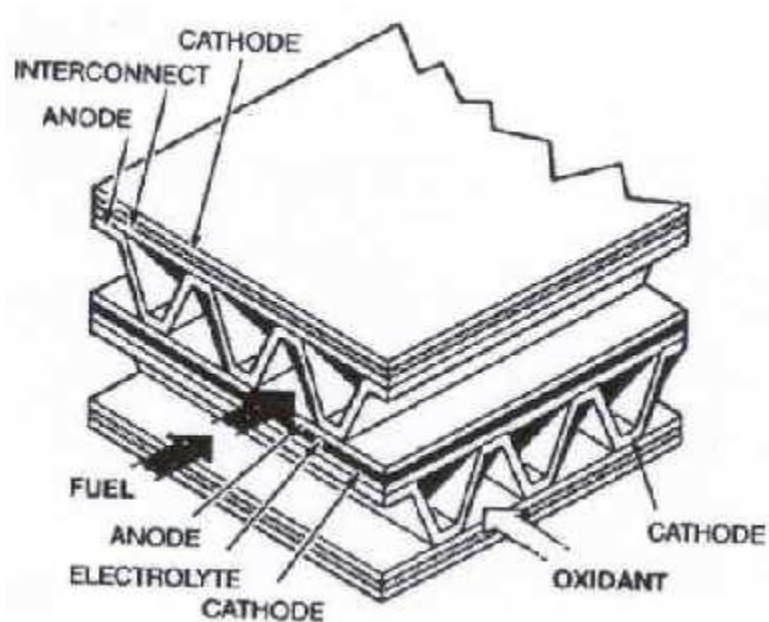
جداسازی پیل در طراحی مدل سری: در این طرح اکسیدان از خارج لوله تامین شده و سوخت از طریق مرکز لوله تامین می شود. سلول ها به صورت سری به یکدیگر متصل می شوند.

۱-۱۵-۳ طراحی یکپارچه:

این طراحی شبیه یک طراحی مبدل حرارتی پیوسته و لوله است زیرا اجزای سلولی نازک از جمله آند الکترولیت کاتد و اتصال به یک ساختار فشرده تر استفاده می کند. دو شکل متفاوت از این طراحی SOFC وجود دارد که عبارتند از تنظیم جریان گاز و جریان متقابل گاز. بترتیب در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۱ طراحی یکپارچه پیل سوختی با تنظیم جریان گازی



شکل ۱۲-۱ طراحی یکپارچه پیل سوختی با جریان متقابل گاز

۱-۱۵-۳ طراحی صفحه ای:

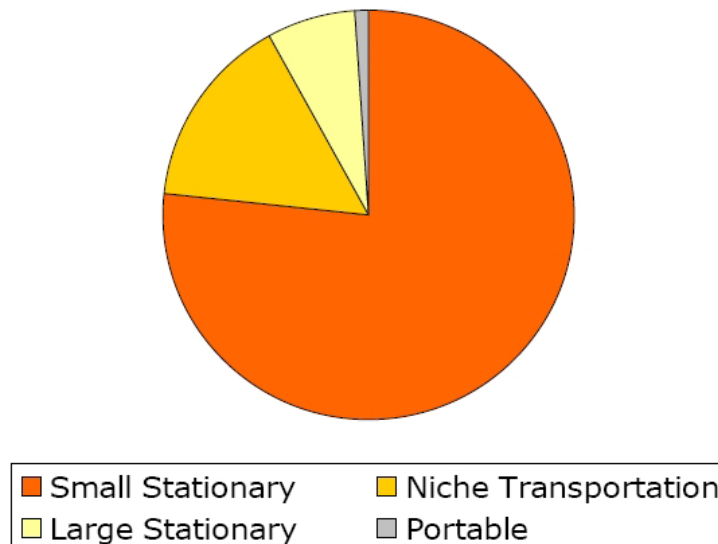
بر خلاف طراحی یکپارچه ورقه های سرامیکی چند لایه تخت تشکیل شده از آند و کاتد و الکترولیت در این طرح استفاده شده است. این صفحه سرامیک چند لایه تخت با صفحات اتصال پوشش داده شده است که دارای کانال های جریان گاز کوچک برای سوخت و اکسیدان است.

۱-۱۵-۴ کاربردهای پیل سوختی اکسید جامد

- کاربردهای ساکن .

- کاربردهای حمل نقل متفرقه.

- کاربردهای پرتابل .



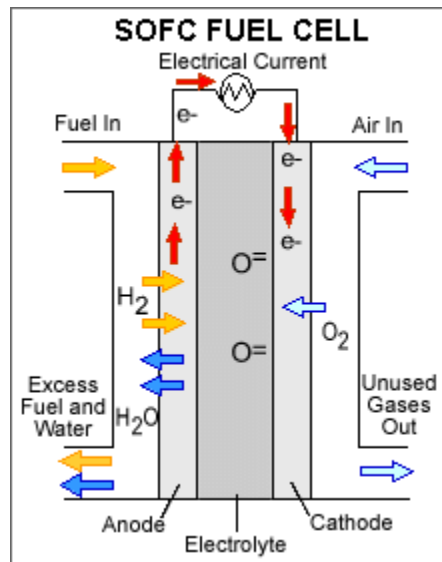
Total Number of SOFC Units Installed Globally by Application

شکل ۱-۱۳ تعداد واحد های SOFC که به طور جهانی توسط برنامه های نصب شده اند. (۱)

بیشترین واحد های پیل سوختی اکسید جامد مربوط به نیروگا های با مقیاس کوچک می باشد و در رده دوم مربوط به حمل و نقل است .

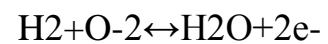
۱-۱۵-۵ تحلیل الکتروشیمیایی پیل سوختی اکسید جامد

مطابق شکل ۱-۱۴، در کاتد اکسیژن هوا با الکترون ترکیب می شود و یون اکسیژن را تولید می کند . هنگامی که یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آنند عبور می کند، یون ها ی اکسیژن از شبکه کریستالی الکترولیت عبور می کنند، تا سوخت را اکسید کنند.

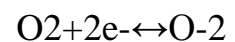


شکل ۱-۴- نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد

-واکنش آند:



-واکنش کاتد:



-واکنش کلی پیل سوختی:

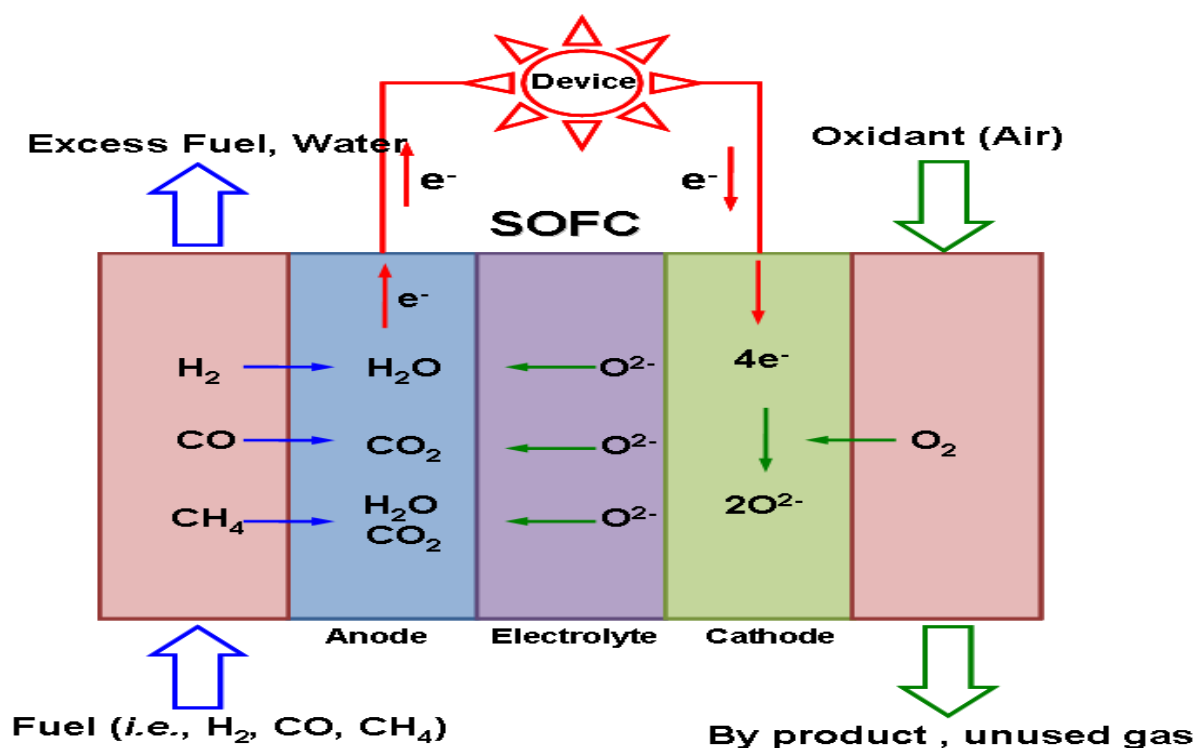


۱-۱۶ انواع ساختارهای پیل های سوختی نوع مسطح از نظر نوع تکیه

پیل های سوختی اکسید جامد را می توان به دو دسته خود پایه تقسیم بندی نمود. در نوع خود پایه، یکی از اجزای پیل سوختی، وظیفه تکیه گاه ساختاری سل را (External supporting) بر عهده دارد. بنابراین تک سل می تواند آند تکیه، کاتد تکیه و یا الکترولیت تکیه باشد. در ساختار تکیه خارجی، کل سل به صورت لایه نازک بر روی اتصال دهنده ها (Interconnect) با یک زیرلایه (Substrate) متخلخل قرار می گیرد.

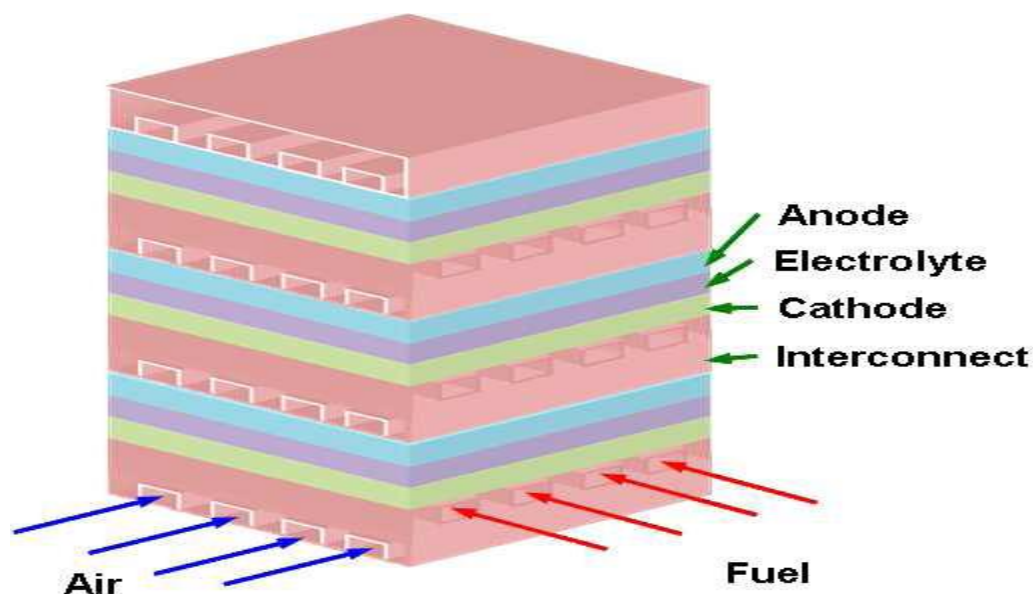
جدول ۱-۲ اجزای یک سلول الکتروشیمیایی اکسید جامد را نشان می دهد.

الکترولیت قلیایی	الکترولیت اسیدی	
آند	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 + 2OH^- \rightarrow H_2O + 2e^-$
کاتد	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- + H_2O \rightarrow 2OH^-$
واکنش کلی	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

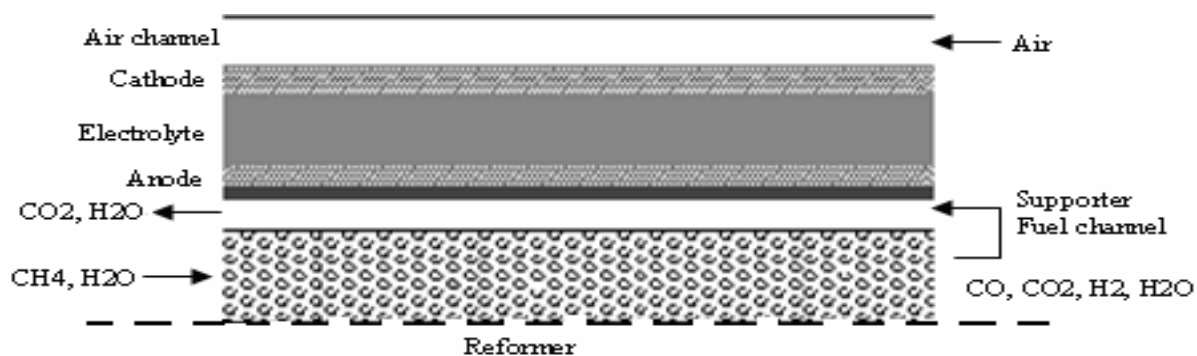


شکل ۱-۱۵ شماتیک پیل سوختی اکسید جامد برای پیکربندی استک را نشان می دهد. (۱)

اجزای اصلی پیل تک الکترولیتی کاتد و آند است. هنگامی که سلول های تک در کنار هم جمع می شوند تا قدرت تولید بیشتر شود. الکترولیت جامد بین الکتروود برای هدایت یون های اکسیژن است اما هدایت الکترون را انجام نمی دهد بنابراین جریان از طریق دستگاه از مدار خارجی عبور می کند. سوخت در آند اکسید شده و اکسیژن در کاتد کاهش می یابد.



شکل ۱-۱۶- شماتیک طراحی پیکربندی استک اکسید جامد (۱)



شکل ۱-۱۷. لایه های مختلف پیل سوختی اکسید (۱)

شماتیک فوق لایه های مختلف پیل سوختی و مواد خروجی و ورودی به پیل را نشان می دهد همچنین رفرمر آن به صورت داخلی می باشد .

فصل دوم

پیشینه پژوهش و مروری بر ادبیات گذشته

۲- اتوربین ها

در این پروژه از دو نوع توربین گازی و توان استفاده شده است. توربین گازی توربین احتراق نیز نامیده می شود. شامل یک نوع از موتور احتراق داخلی و یک کمپرسور از بالا دست به سمت پایین دست در امتداد یک توربین و یک اتاق احتراق می باشد. دستگاهی است که برای تولید قدرت از منبع گاز فشار بالا با استفاده از روش های آیرودینامیک استفاده می شود و از طریق یک کمپرسور به فشار بیشتری وارد می شود. و سپس به یک جریان با درجه حرارت بالا بعنوان یک پمپاژ سوخت به هوا ایجاد شده و آن را احاطه می کند. گاز با درجه حرارت و فشار بالا به توربین که در آن پیدایش یافته به تولید کار منجر می شود. کار شفت توربین برای حرکت کردن کمپرسور و سایر دستگاه هایی مانند ژنراتور الکتریکی که ممکن است به شفت وصل شود استفاده می شود. انرژی در گاز خروجی از شفت با گرما و سرعت بالای مجموعه توربین استفاده می شود تا حداکثر انرژی مورد نظر باشد بعنوان مثال در هواپیما قطار و توربین گاز و ژنراتور برق کشتی و مخازن مورد استفاده قرار می گیرد.

۲-۲ ساختار پیل های سوختی اکسید جامد توربین گازی

جهت افزایش راندمان سیستم های پیل سوختی اکسید جامد همراه با توربین گازی کوپل می شوند که به سیستم های هیبریدی معروف هستند .

۲-۳ اسمز معکوس :

۲-۳-۱ ساختار اسمز معکوس :

اسمز معکوس فرایند فیزیکی می باشد. با اسمز معکوس می توان از محلول حلال تقریباً خالص را جدا کرد. همچنین اقتصادی ترین روش برای تهیه آب آشامیدنی از آب شور در مناطق کم آب است. اساس کار اسمز معکوس فشار اسمزی می باشد. فشار اسمزی به نوع ناخالص و غلظت آن بستگی دارد. در این فرایند آب خام بوسیله پمپ به محفظه دارای غشاء نیمه تراوا وارد می شود. در مدول آب روی غشا تحت فشار است. ناخالصی ها عبور نکرده و مولکولهای آب عبور می کنند.

تفاوت اسمز معکوس با فیلتراسیون معمولی این است که در فیلتراسیون جریان آب عمود بر بستر فیلتر است در حالیکه در اسمز معکوس به صورت موازی می باشد. همچنین گرفتگی غشا در اسمز کمتر از

فیلتر است. در اسمز دو جریان خروجی وجود دارد یکی آب تصفیه شده و دیگری خوراک تغلیظ شده. در اسمز معکوس تاثیر دما دوگانه است : افزایش عدد پی و کاهش ویسکوزیته.

نمک زدایی شیرین کردن آب اشاره به هریک از چند فرآیندی است که مقداری نمک و سایر مواد معدنی را از آب شور جدا می کند . منظور از نمک ها و مواد معدنی همانند نمک زدایی خاک می باشد . آب شور جهت تولید آب شیرینی که برای مصارف انسان و آبیاری مناسب است نمک زدایی می شود . یک محصول جانبی بالقوه از نمک زدایی نمک است . بیش تر سرمایه گذاری های اخیر در نمک زدایی بر توسعه راه های مقرون به صرفه تامین آب شیرین کن برای استفاده انسان متمرکز شده است . به گفته انجمن بین المللی نمک زدایی در سال ۲۰۰۹, ۱۴۴۵۱ واحد نمک زدایی در سراسر جهان در حال بهره برداری بوده که ۹,۹۵ میلیون مترمکعب در روز تولید می کرده اند . با افزایش تولید سالیانه برابر ۳,۱۲٪ تولید در سال ۲۰۱۰ برابر ۶۸ میلیون متر مکعب بوده و انتظار می رود که تا سال ۲۰۲۰ به ۱۲۰ میلیون متر مکعب برسد. ۴۰ میلیون مترمکعب در خاورمیانه برنامه ریزی شده است .بزرگ ترین کارخانه آب شیرین کن در جهان در کارخانه نمک زدایی جبل علی (فاز ۲) در امارات متحده عربی می باشد .

از منظر اقتصادی : فاکتورهای تعیین کننده هزینه آب شیرین کن عبارتند از : ظرفیت و نوع تاسیسات همچنین محل و آب و نیروی کار انرژی و منابع مالی می باشد دستگاه های تقطیر نمک زدایی در حال حاضر فشار و دما و غلظت آب نمک جهت بهینه سازی بهره وری کنترل می کنند . طی سال های اخیر هزینه تولید دستگاه های نمک زدایی تا حد قابل توجهی کاهش یافته اما هزینه تولید آب به کمک آن چه ما روش سنتی می نامیم افزایش یافته است . منابع آب شیرین کن حاصل از رودخانه ها و منابع آب زیر زمینی محدود است و با سرعت فزاینده ای در حال تهی شدن می باشد و زنگ خطر را در بسیاری از مناطق جهان به صدا در آورده است .

این فناوری برای برخی از مناطق که کمبود آب دارد یا دور از دریا در ارتفاع قرار دارند می تواند راه حل مناسبی باشد و شامل مناطقی است که مشکلات در زمینه آب دارند .این فرایند در جاهایی مثل پکن بانکوک و ساراگوسا نسبتا ارزان تر است و شهرهای ساحلی همچون ترابلس .برای شهرهای ساحلی نمک زدایی آب به طور فزاینده ای به عنوان یک منبع آب بکر و نامحدود در نظر گرفته می شود .در سال ۲۰۰۵ در اسرائیل هزینه های نمک زدایی ۵۳ سنت به ازای هر متر مکعب و در سال ۲۰۰۶ در سنگاپور نمک زدایی از آب ۴۹ سنت به ازای هر متر مکعب رسید . در سال ۲۰۰۶ شهر پرت شروع به بهره برداری از کارخانه نمک زدایی آب دریا به روش اسمز معکوس نمود در حال حاضر در بزرگترین شهر استرالیا یعنی

سیدنی کارخانه آب شیرین کن در حال بهره برداری است و کارخانه نمک زدایی دیگری در ویکتوریا در حال ساخت است .

روش : یک سیستم آب شیرین کن به طور کلی آب شور را به دو جریان تقسیم می کند یکی جریان آب خالص با در صد بسیار کمی از نمک و املاح و دیگری جریانی که حاوی نمک املاح باقی مانده میباشد . جداسازی نمک از مخلوط آب نمک یک فراینده ترمودینامیکی است که نیاز به انرژی دارد یک فرایند ایده ال آب شیرین کن به عنوان یک فرایند جداسازی برگشت پذیر محسوب می شود .

کارآمد ترین تکنولوژی آب شیرین کن دارای مصرف ۴ الی ۵ کیلو وات به ازای هر یک مترمکعب آب شیرین کن است . سه روش آب شیرین کن شامل :

۱- multi effect distillation (med)

۲- multi stage flash distillation (msf)

۳- vapor compression distillation (vcd)

هر کدام از این فناوری ها نیاز به انرژی دارند که از طریق انرژی گرمایی یا کانیکی و یا الکتریکی تامین می شوند .

۵ فناوری عمده به منظور زدودن نمک و دیگر مواد جامد غیر قابل حل از آب عبارتند از : تقطیر - اسمز معکوس - الکترو دیالیز - تبدیل یونی و نمک زدایی انجماد .

اکثر کشورهای خشک و نیمه خشک با مشکلات ناشی از کمبود آب مطلوب مواجه هستند و در نتیجه این کشور ها در صدد تامین آب به میزان بالا هستند . شیرین سازی آب دریا تبدیل به یک منبع عظیم برای تولید آب جهت مصارف کشاورزی و صنعتی و خانگی در بسیاری از مناطق جهان گردیده است .

۲-۴ مفهوم قانون اول ترمودینامیک

قانون اول ترمودینامیک که به عنوان قانون بقای کار و انرژی نیز شناخته می شود، می گوید که حالت تعادل ماکروسکوپی یک سیستم با کمیتی به نام انرژی درونی بیان می شود. انرژی درونی دارای خاصیتی است که برای یک سیستم منزوی (ایزوله) مقداری ثابت است. مثلاً ۱۰۰ کیلو ژول گرما با ۱۰۰ کیلو گرم کار یکسان است ولی در واقع همه گرما به کار تبدیل نمی شود که توسط قانون دوم ترمودینامیک رفع می شود .

۲-۵ مفهوم انرژی و قانون دوم ترمودینامیک

انرژی به معنایی حداکثر کار مفید در یک سیستم می باشد. قانون دوم ترمودینامیک بیان می کند که در یک پروسه طبیعی ترمودینامیکی جمع انرژی تک افتاده سیستم های شرکت کننده در آن پروسه، همواره با گذشت زمان افزایش می یابد، (تنها اگر در شرایط ایده آل حالت دائمی، یا تحت فرایند برگشت پذیری قرار داشته باشد، ثابت می ماند). به بیان دیگر هیچ پروسه ترمودینامیکی وجود ندارد که با گذشت زمان با افزایش انرژی همراه نباشد. این افزایش انرژی برابر است با افزایش اتلاف انرژی، (و سازگار با فرایند برگشتناپذیر و اصل نابرابری گذشته و آینده). از دیدگاه تاریخی، قانون دوم یافته هایی تجربی بود که به عنوان یک اصل بدیهی نظریه ترمودینامیکی پذیرفته شده بود. ترمودینامیک آماری، کلاسیک یا کوانتومی آن، منشأ میکروسکوپی این قانون را توضیح می دهد.

۲-۶ ادبیات گذشته و کارهای دیگران

در میان پیل های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد به دلیل دمای بالای گازهای خروجی ۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس پتانسیل بسیار خوبی را داراست. یکی از موارد پرکاربرد پیل های سوختی اکسید جامد در سیستم های تولید همزمان، ترکیب این نوع پیل ها با انواع مختلف میکروتوربین های گازی است. میکروتوربین ها مولدهای کوچک برق اند که سوخت گازی یا مایع را سوزانده و یک ژنراتور را با سرعت بالا به چرخش در می آورند. در اوایل سالهای ۱۹۸۰، بازدهی و قابلیت اطمینان میکروتوربین ها به مقداری رسید که صنعتی بزرگ مناسب شناخته شدند. (۲) ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با میکروتوربین برای کاربرد در سیستم های CHP است که امروزه برای تامین مستقل انرژی در قالب سیستم های تولید همزمان (SOFC-MGT) گازی سیستم هیبریدی جدیدی مورد توجه قرار گرفته است. این نوع از سیستم های هیبریدی به خاطر افزایش بازده، کنترل توان تولیدی، بازیابی حرارت و همچنین قابلیت تولید توان در ظرفیت های مختلف مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است (۲) بازده این نوع از سیستم های هیبریدی بسیار بیشتر از بازده میکروتوربین گاز و یا پیل سوختی تنها بوده و نتایج تحقیقات اخیر نشان می دهد که با استفاده از این نوع سیستم ها میتوان به بازده در حدود ۶۵ درصد دست یافت (۲) مطالعه تحقیقات گذشته در مورد سیستم های هیبریدی نشان می دهد که بررسی های نظری بر روی این نوع از سیستم های هیبریدی برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ میلادی توسط شرکت زیمنس وستینگهاوس صورت گرفت.

از نخستین تحقیقات انجام شده در این زمینه میتوان به تحقیقات هاروی و ریچتر (۳)، لی و سودهوف (۴) چانی و همکاران (۵) و ماساردو و لوبلی (۶) اشاره کرد. در ادامه این تحقیقات، شرکت آمریکایی زیمنس وستینگهاوس در سال ۱۹۹۸ میلادی اولین نیروگاه ۱۰۰ کیلوواتی پیل سوختی را در وسترورت هلند راه اندازی کرد. (۷) در ژانویه سال ۲۰۰۰ همین شرکت با حمایت دولت ایالات متحده در مرکز ملی پژوهش های پیل سوختی در دانشگاه کالیفرنیا، یک پیل سوختی اکسید جامد را که در فشار ۳ اتمسفر عمل می کرد با یک میکروتوربین گاز با توان ۵۰ کیلووات ترکیب کرد. سیستم ساخته شده دارای توان اسمی ۲۲۰ کیلووات بود که ۱۷۰ کیلووات آن از پیل سوختی و ۵۰ کیلووات آن از توربین گازی به دست آمده بود. بازده این سیستم ۵۷ درصد محاسبه شده بود (۷) در همان سال فناوری پیل سوختی اکسید جامد لوله ای، ساخت شرکت زیمنس وستینگهاوس، توسط سینگال بررسی شد. (۸) در ادامه مدل های ترمودینامیکی و ریاضی متفاوتی توسط گروه های تحقیقاتی متعددی توسعه و استخراج شد. به عنوان یکی از اولین تحقیقات، آی دی و همکاران (۹) و سپس کستامگنا و همکاران (۱۰) تحلیل و طراحی سیستم های هیبریدی میکروتوربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد را انجام دادند. در بین سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ نیز پالسون (۱۱) و سلیموویچ (۱۲) تحقیقات بسیار خوبی در زمینه سیستم های هیبریدی ارائه کردند. آنها در یکی دیگر از تحقیقات خود یک نشان دهنده (Aspen Plus) سیستم ترکیبی ۵۰۰ کیلوواتی را بررسی کردند. (۱۳) مدل سازی آنها با استفاده از نرم افزار آسپن تاثیر زیاد نسبت فشار در عملکرد سیستم بود. نتایج نشان می داد که در نسبت فشارهای پایین بازده الکتریکی سیستم بالای ۶۵ درصد بود. چان و همکاران (۱۴) در سال ۲۰۰۲، اوچی و همکارانش (۱۵) در سال ۲۰۰۴، راجاشکارا (۱۶) در سال ۲۰۰۵ مطهر و همکاران (۱۷) در سال ۲۰۰۷، سانگ و همکاران (۱۸) لای و همکاران (۱۹) حاصلی و همکاران (۲۰) کوکو (۲۱) و کوماتسو و همکاران (۲۲) از جمله کسانی بوده اند که در مورد مدل سازی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد ترکیبی با میکروتوربین گاز و کاربرد آن در سیستم های تولید همزمان تحقیقات بسیار خوبی انجام داده اند.

در سال های اخیر، پیل سوختی، یکی از پر بازده ترین منابع تولید انرژی بوده است. پیل سوختی، نسبتاً آرام و بی صداست، به همین دلیل جهت تولید برق محلی مناسب می باشد. (۲۳) همچنین پیل سوختی به عنوان یک فن آوری نوین برای تولید توان در توربین های گازی به کار گرفته و باعث افزایش بازده تا ۶۰٪ می شود، در حالی که در توربین های گازی معمولی، به علت تلفات زیاد در محفظه احتراق، بازده در حدود ۳۰ تا ۳۵٪ است. از میان انواع پیل سوختی، نوع اکسید جامد به دلیل راندمان بالا، آلودگی کم،

تنوع سوخت مصرفی و از همه مهم تر دمای بالای گاز خروجی، بهترین گزینه برای استفاده در توربین گازی به شمار می رود. به همین دلیل در سال های اخیر، این تکنولوژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۲۴، ۲۵) گرچه تحقیقات در زمینه پیل سوختی اکسید جامد از اواخر دهه ۵۰ میلادی آغاز گردید، ولی نتایج یک مدل ساده پیل سوختی اکسید جامد در اواسط دهه ۸۰ منتشر شد؛ لذا اولین مقالات در زمینه سیستم های ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد به اوایل دهه ۹۰ برمی گردد. مفهوم به کارگیری توربین گاز در کنار پیل سوختی، سال هاست که شناخته شده و تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از قانون اول ترمودینامیک بر روی آن انجام شده است. در سال ۲۰۰۰، ماسارادو و لوبلیک مطالعه مفهومی درباره بررسی عملکرد سیکل ترکیبی انجام دادند. (۲۶) مدل ریاضی ارائه شده توسط آن ها، عملکرد پیل را در حالت یکنواخت و پایدار شبیه سازی می کرد. کاستامگنا و همکاران، طراحی و عملکرد سیستمی متشکل از میکروتوربین گاز با بازیاب حرارتی و پیل سوختی اکسید جامد دما بالا را مورد آزمایش قرار دادند. همچنین کارهای متعدد دیگری در این زمینه توسط محققان مختلف مانند چان و همکاران (۲۷، ۲۸) انجام شده است. یانگ و همکاران (۲۹) دو سیستم با بهسازی سوخت به صورت داخلی و خارجی در نظر گرفتند و تأثیر محدودیت در اختلاف دمای استک پیل سوختی را بر عملکرد آن ها بررسی کردند. پارک و همکاران (۳۰) مشخصات طراحی و عملکرد یک سیستم ترکیبی را با در نظر گرفتن یک توربین گاز مشخص بررسی کردند. در بیشتر تحقیقات مذکور، عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی و توربین گاز با توجه به قانون اول ترمودینامیک بررسی شده است. همچنین کار های گوناگون دیگری با در نظر گرفتن قانون دوم ترمودینامیک بر روی این سیستم انجام شده که به بررسی قانون دوم ترمودینامیک بر روی سیستم و هر یک از اجزای آن می پردازد و نرخ برگشت ناپذیری را در اجزای سیستم بررسی می کند. دانستن سهم هر یک از اجزا از نرخ برگشت ناپذیری کل سیستم، می تواند منشأ بهبود و اصلاح در اجزا و فرآیند سیستم شود. هسلی و همکاران (۳۱، ۳۲) در دو مطالعه جداگانه، به بررسی تخریب انرژی و آنتروپی تولیدی در یک سیستم ترکیبی پرداختند. آنان نشان دادند که با اضافه شدن پیل ۲۷ درصد افزایش سوختی به توربین گاز، بازده قانون اول به میزان ۸ درصد می یابد.

با توجه به روند رو به رشد مصرف انرژی در جهان، استفاده از روش ها و سیستم های جدید تولید توان که علاوه بر راندمان بالا دارای آلایندهی پایینی باشند، در اولویت قرار گرفته است. پیل سوختی به دلیل راندمان بالا در تبدیل انرژی شیمیایی سوخت فسیلی به انرژی الکتریکی و انتشار ناچیز آلاینده ها، یکی از این موارد می باشد. از میان انواع مختلف پیل های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد به دلیل دمای بالای

کارکرد آن قابلیت استفاده در سیستم های تولید توان و یا تولید همزمان توان و حرارت را دارد. به علاوه قابلیت پیل سوختی اکسید جامد در ترکیب با سیکل های تولید توان مانند سیکل توربین گاز، سبب شده است که سیکل ترکیبی حاصل به عنوان پیشنهادی برای نیروگاه های آینده مدنظر باشد. مفهوم استفاده از پیل سوختی اکسید جامد در سیکل توربین گاز از سال ها پیش مطرح شده است. مرکز ملی پژوهش های پیل سوختی در دانشگاه کالیفرنیا ساخته شد. این بررسی مقالات نشان می دهد که این مفهوم اولین بار توسط یوشیدا و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. آنها می دانستند عمده بازگشت ناپذیری در سیکل توربین گاز سنتی مربوط به فرآیند محفظه احتراق است. بنابراین اگر از تماس مستقیم بین سوخت و هوا جلوگیری شود و احتراق صورت نگیرد، راندمان حرارتی بیشتر خواهد شد، همان گونه که در پیل سوختی اتفاق می افتد. (۳۳) مدل های ترمودینامیکی و ریاضی، توسط گروه های تحقیقاتی متعددی توسعه و استخراج شده است، که از مهمترین آنها می توان به گروه هایی از جمله لوبلی و ماساردو و کمپاناری و ماکچی اشاره نمود، که از ترکیب انواع پیل های سوختی و سیکل های توانی با اندازه های متفاوت استفاده شده بود. پیل های سوختی مورد مطالعه عموماً از نوع پیل سوختی اکسید جامد صفحه ای بودند که در ترکیب با سیکل گازی یا دیگر سیکل ها در توان های بالا مورد بررسی قرار گرفتند. در آنها از گاز طبیعی به عنوان سوخت استفاده شده بود. نتایج برای سیستم های کوچک راندمان حدود ۵۵ درصد و برای سیستم های بزرگتر تا ۷۷ درصد را نشان می دهد (۳۴، ۳۵) شرکت های زیادی در جهان در حال پژوهش، ساخت و گسترش سیستم های ترکیبی از این دست می باشند. از جمله شرکت زیمنس - وستینگ هاوس برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ به مطالعه در این زمینه پرداخت. این شرکت مبدع پیل سوختی اکسید جامد لوله ای است. فناوری پیل سوختی اکسید جامد لوله ای، ساخت شرکت زیمنس - وستینگ هاوس در سال ۱۹۹۹، توسط سینگال بررسی شد. سینگال در مطالعه خود به مزایای استفاده از پیل سوختی اکسید جامد لوله ای در ترکیب با میکروتوربین ها تحت فشار بالا یا تحت فشار اتمسفر پرداخته است. همچنین ساختمان و جنس اجزاء پیل، نمودار ولتاژ - جریان تولیدی این پیل برای سوخت هیدروژن بررسی شده است. (۳۶) از سال ۱۹۹۷ در هلند یک نمونه ۱۰۰ کیلوواتی از این سیستم تحت فشار اتمسفر، برای تولید همزمان توان و حرارت شروع به کار کرد. با ساخت میکروتوربین هایی با توان زیر ۲۵۰ کیلووات و امکان ترکیب عملی آنها با پیل های سوختی موجود، پژوهش ها در زمینه سیستم ترکیبی شتاب بیشتری گرفت. اولین سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز در سال ۲۰۰۰ در سیستم دارای توان اسمی ۲۲۰ کیلووات بود. در این سیستم از پیل سوختی اکسید جامد که در هلند

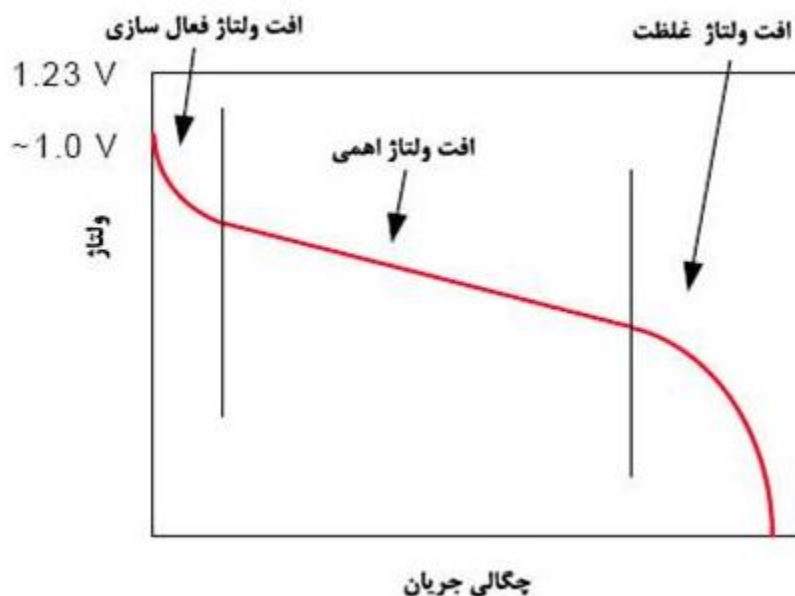
آزمایش شده بود، استفاده شده است. (۳۷) اختلاف پتانسیل تولید شده توسط پیل یا ولتاژ آن، یک عامل بسیار مهم در تعیین عملکرد آن می باشد. از طرفی در پیل سوختی به دلایل مختلف افت ولتاژ وجود دارد. چنان و همکاران تحلیل کاملی از افت ولتاژ درون پیل سوختی اکسید جامد لوله ای و حساسیت ولتاژ نسبت به ضخامت اجزاء پیل را ارائه کردند (۳۸) در ادامه این کار، چان و همکاران یک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی را مدل سازی کردند. در این سیستم ترکیبی از یک پیل سوختی اکسید جامد لوله ای با بهسازی داخلی، که متان درون خود پیل به هیدروژن تبدیل می شود، استفاده شده است. (۳۹) دمای گازهای خروجی از توربین گاز معمولاً زیاد است و می توان جهت تولید بخار آب از آن استفاده نمود. یکی از جنبه های تجاری در استفاده از این بخار، توربین گاز با تزریق بخار می باشد. در آخرین پژوهش انجام گرفته در این زمینه، عالم رجبی و مطهر به آنالیز اگزرژی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد لوله ای و توربین گاز با تزریق بخار پرداختند. برای این منظور از حرارت گازهای خروجی توربین برای تولید بخار و تزریق آن به محفظه احتراق استفاده شده است، که باعث افزایش راندمان، اگزرژی و راندمان حرارتی شده است (۴۰) توربین گاز نقش بسیار مهمی در تأمین برق مورد نیاز کشور مخصوصاً در زمان اوج مصرف بر عهده دارد.

افت ولتاژها را می توان در سه گروه اصلی افت ولتاژ فعال سازی، افت ولتاژ اهمی و افت ولتاژ غلظت یا انتقال جرم طبقه بندی کرد. روابط مربوط به محاسبات افت ولتاژها در مرجع (۴۰) به طور کامل شرح داده شده است. با در نظر گرفتن کلیه پدیده های حاکم بر پیل سوختی، مقدار ولتاژ خروجی پیل به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$V = V_{re} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (1-2)$$

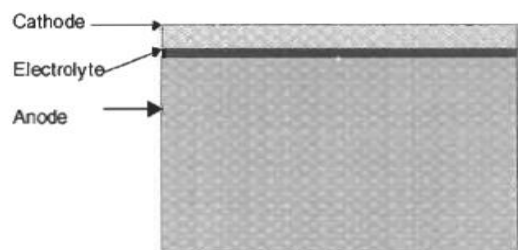
عملکرد یک پیل سوختی عموماً با منحنی ولتاژ بر حسب چگالی جریان نمایش داده می شود، که به آن منحنی قطبیت پلاریزاسیونی گویند.

معمولاً، یک پیل واحد ولتاژی بین صفر تا یک ولت تولید می کند. مطابق شکل ۲ در منحنی قطبیت، بیشترین ولتاژ بازگشت پذیر همراه با افت های ولتاژ نشان داده شده است. در حالت کلی، بیشترین ولتاژ تئوری مربوط به زمانی است که جریانی وجود ندارد. ولی در عمل، ولتاژ مفید خروجی مقداری کمتر از ولتاژ تئوری است و با افزایش بار و چگالی جریان مقدار آن کاهش می یابد. (۴۱)

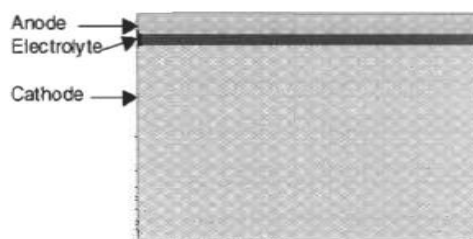


شکل ۱-۲ منحنی قطبیت پیل سوختی (۴۱)

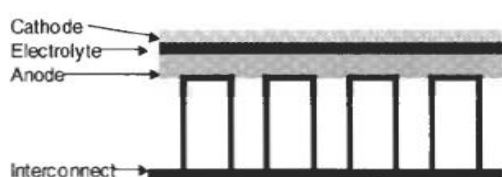
در این نمودار ولتاژ پیل سوختی (ولت) بر حسب چگالی جریان بوده که با افزایش ولتاژ کاهش چگالی جریان را داریم به صورتی که در قسمتی از افزایش ولتاژ ابتدا چگالی به صورت نزولی بوده که افت ولتاژ فعال سازی نامیده می شود و سپس در قسمتی از نمودار کاهش نسبی و کمی وجود دارد که افت ولتاژ اهمی گفته می شود و در نهایت افت ولتاژ غلظت را خواهیم داشت. چگالی جریان الکتریکی یک تابع نقطه‌ای است که مقدار جریان گذرنده از سطحی واحد و عمود بر مسیر عبور جریان را اندازه می‌گیرد. افت ولتاژ بیان‌گر چگونگی کاهش انرژی در یک مدار الکتریکی است که آن انرژی؛ از یک منبع تأمین‌کننده ولتاژ، با گذراندن جریان الکتریکی در قطعات کنش‌پذیر آن (مصرف‌کننده انرژی که در تأمین ولتاژ نقش ندارند)، تأمین می‌شود.



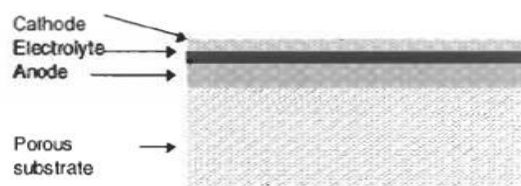
Anode-supported cell



Cathode-supported cell



Interconnect-supported cell



Porous substrate-supported cell

شکل ۲-۲ یک مقطع از پیل سوختی اکسید جامد لوله ای با ریفرمینگ داخلی غیر مستقیم (۴۲)

در فشارهای متوسط و بالا، سرعت ریفرمینگ متان کمتر می شود و در نتیجه افت دمایی کمتری در ورودی ریفرمر ایجاد می شود. افزایش فشار با افزایش انرژی گیس واکنش الکتروشیمیایی و در نتیجه افزایش ولتاژ بازگشت پذیر و همچنین با کاهش افت پتانسیل غلظتی، ولتاژ نهایی تولیدی پیل را افزایش می دهد. گرایش به سمت پیل های سوختی اکسید جامد از بازده بالاتر و آلودگی پایین تر آنها در مقایسه با روشهای تولید انرژی سنتی ناشی می شود. اجزای اتصال دهنده از قسمت های بسیار مهم و بحرانی در توده پیل سوختی اکسید جامد هستند که از نظر الکتریکی سلول ها را به صورت سری به هم متصل کرده و در عین حال هوا یا اکسیژن در اطراف کاتد را از سوخت در اطراف آن جدا می نمایند. بنابراین ضروری است که اتصال دهنده ها دارای هدایت الکتریکی بالا، پایداری نزدیک و سازگاری خوب با دیگر اجزای (CTE) خوب در اتمسفرهای احیایی و اکسیدی، ضریب انبساط حرارتی باشند. پیل های سوختی وسایل تبدیل انرژی هستند که انرژی شیمیایی سوخت را از طریق انجام جداگانه دو نیم واکنش الکتروشیمیایی اکسیداسیون و احیاء مستقیماً به جریان برق تبدیل می کند. (۴۲) یک پیل سوختی از الکتروود آند در ارتباط با سوخت (الکتروولیت و الکتروود کاتد) در ارتباط با اکسیدان تشکیل شده است. از نقطه نظر طراحی دو نوع اصلی که در تکنولوژی ساخت پیل سوختی اکسید جامد متداول شده است طرح لوله ای

و صفحه ای می باشد. در بین انواع پیل های سوختی اکسید جامد، نوع صفحه ای آن دارای دانسیته انرژی بالاتر، قیمت پایین تر و قابل اتوماتیک شدن می باشد. تحت شرایط عادی کاربردی، یک سلول واحد کمتر از یک ولت پتانسیل الکتریکی ایجاد می کند. بنابراین در کاربردهای عملی پیل های سوختی به صورت منفرد کار نمی کنند بلکه تعداد زیادی از سلولهای واحد نسبتاً کوچک به یکدیگر متصل شده اند تا جریان الکتریسیته لازم را فراهم کنند. سری این سلولهای شناخته میشوند. یک جزء متراکم هادی جریان با نام اتصال کننده داخلی آند یک سلول را به کاتد (Stack) واحد به نام توده سلول بعدی در یک توده متصل می کند.

بنابراین باید موارد زیر در نظر گرفته شود:

- مبانی تئوریک در خصوص چگونگی عملکرد پیل های سوختی .

- شناخت ابزار تکنولوژیک پیل های سوختی و مقایسه آنها .

- بررسی توانمندیهای داخلی در زمینه های مرتبط .

- بررسی شرایط خاص کاربرد مورد نظر.

- بیان روش حصول تکنولوژی نوع مورد نظر پیل سوختی .

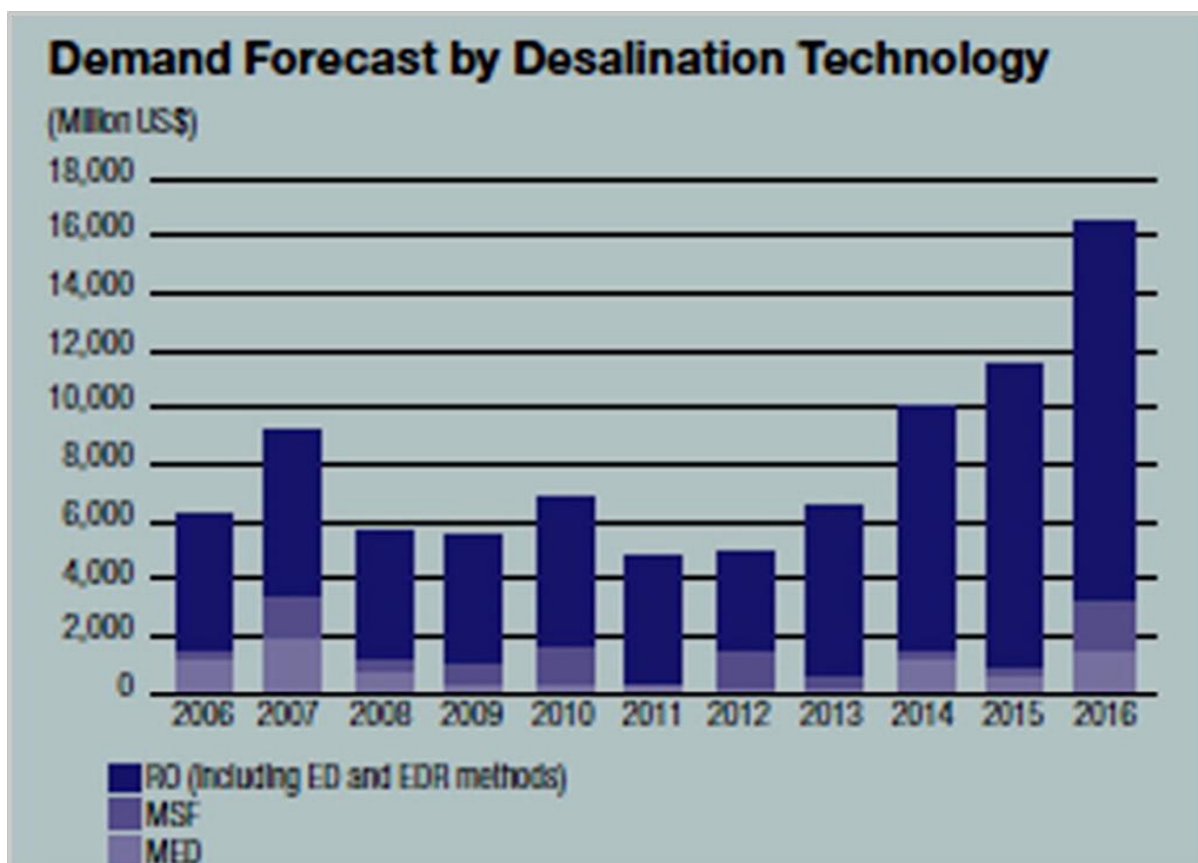
- طراحی منجر به ساخت پیل سوختی مورد نظر .

نیاز به انرژی پاک و کاهش تولید گازهای گلخانه ای، تلاش برای یافتن جایگزینی برای تولید انرژی را افزایش داده است. در بازار تولید انرژی، هیبرید پیل سوختی و توربین گاز، با سیستم هایی از چند ده کیلووات تا چندین مگاوات تولید انرژی الکتریکی را پوشش می دهند یک گزینه جالب می باشد. پیل سوختی یک مولد قدرت الکتریکی است که سوخت و اکسید کننده را به عنوان ورودی می گیرد و ۵۵٪ الکتریسیته را به عنوان خروجی تحویل میدهد و قابلیت تولید الکتریسیته با بازدهی بالا بر مبنای مقدار حرارتی پایین تر و تولید آلاینده پایین را دارند. در میان انواع پیل های سوختی، پیل های سوختی اکسید جامد دارای دمای عملیاتی بالا میباشند و به همین دلیل میتوانند نقش مبدل داخلی را داشته باشند. این امر سبب می شود تا در این نوع پیل از سوخت های فسیلی نظیر گاز طبیعی بتوان بطور مستقیم مورد استفاده

کرد. در این پروژه، سیکل ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز همراه با تزریق بخار به لحاظ ترمودینامیکی مورد بررسی قرار میگیرد. سیکل مفروض شامل کمپرسور هوا و سوخت، پیل سوختی اکسید جامد، محفظه احتراق و توربین گاز و بازیاب حرارتی تولید می باشد. با توجه به دمای بالای عملکرد پیل های سوختی اکسید جامد، استفاده (HRSG) کننده بخار از انرژی محصولات خروجی از آن مورد توجه قرار دارد و از آن جهت تولید بخار جهت تزریق به توربین بخار استفاده میشود، زیرا تحقیقات افزایش راندمان سیکل های همراه با تزریق بخار را نشان میدهد. طبق مطالعات انجام شده یکی از روش های تحلیل ترمودینامیکی، استفاده از تحلیل انرژی که بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک میباشد، لذا تحلیل انرژی، جهت کلیه اجزاء موجود در سیکل استفاده می گردد.

سلول سوختی اکسید جامد و توربین گازی ترکیبی بعنوان مهم ترین سیستم در فناوری DOE در چشم انداز ۲۱ در نظر گرفته شده است. اگرچه گرمای اضافی پیل اکسید جامد را میتوان با استفاده از توربین گاز بهبود ساخت اما گاز خروجی از هنوز دارای درجه حرارت نسبتاً بالایی است که این پروسه میتواند به افزایش راندمان تبدیل انرژی با استفاده از برخی روش های بازیابی از گرمای اضافی توربین گازی کمک کند. آرساليس با استفاده از توربین بخار به اصطلاح گرمای اضافی از توربین گازی و نتایج تحلیل و تجزیه دینامیکی نشان داد که چرخه پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز می تواند به راندمان الکتریکی بالاتر در مقایسه با سیستم مرجع برساند. (۴۲) آکای و همکارانش با تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم CHP براساس پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز دادند که سیستم CHP بالاترین بازده تبدیل انرژی را داراست (۴۳) یان و همکارانش سیستم پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز و چرخه رانکین آلی را مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از این چرخه برای بازیابی گرمای هدر رفته از توربین گازی نشان دادند که بازده الکتریکی پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی با سیکل رانکین آلی به ۶۵٪ می رسد (۴۴، ۴۵) وانگ و همکارانش در مورد یک سیستم یکپارچه مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز و چرخه کالینا که نشان می دهد پیل سوختی اکسید جامد با سیکل رانکین آلی از پیل سوختی اکسید جامد با توربین گازی راندمان بالاتری را داراست. (۴۶) گووا و همکارانش با مقایسه سیکل TRCC و رانکین آلی ، نشان دادند که خروجی TRCC بالاتر از سیکل رانکین آلی است (۴۷) زو و همکاران با بررسی اثرات متوسط مبدل IHX به TRCC نشان دادند که TRCC با IHX می تواند قدرت خروجی بیشتری نسبت به بدون مبدل با بازده الکتریکی بالاتر تولید کند. سیستم

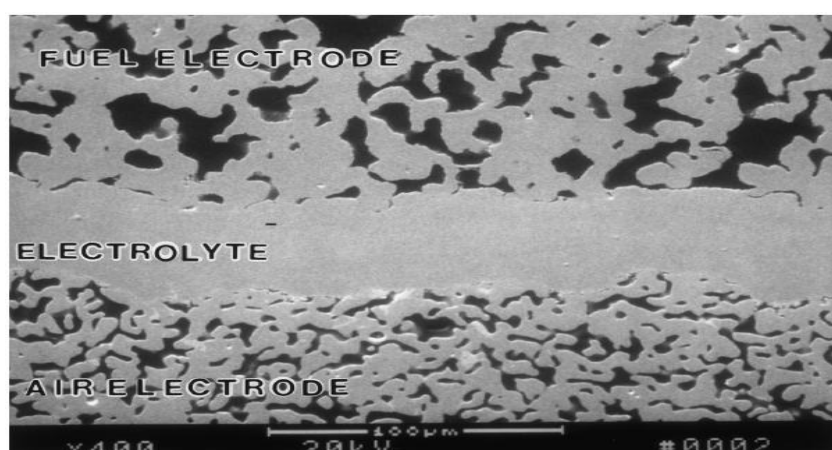
های اسمز معکوس و تجزیه و تحلیل در سالهای اخیر به وفور استفاده می شوند که در شکل ۱ گزارش شده است. (۴۸)



شکل ۲-۳ میزان استفاده از سیستم های آب شیرین کن مختلف در سال های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ را نشان می دهد. (۴۸)

بیش از ۵۰٪ از سیستم های آب شیرین کن در این فناوری در سراسر جهان استفاده می شود. در حالیکه نیروگاه های دیگر از سیستم های حرارتی استفاده می کنند. ایجاد انرژی کافی در این سیستم ها نشان دهنده یک تغییر در استفاده از سوخت های فسیلی می باشد همچنین مقدار آلودگی کاهش پیدا می کند. در سال های اخیر استفاده از سوخت های فسیلی برای تولید آب شیرین کن در توربین گازی بعنوان یک موضوع جدی در نظر گرفته شده است. توسط این روش مقدار آلودگی تا حد امکان می تواند کاهش پیدا کند. استفاده از اسمز معکوس در سراسر جهان در حال رشد است. در سال ۲۰۱۱ گومار و همکارانش تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی برای انواع مختلفی از سیستم های آب شیرین کن در آب و هوای عسلویه انجام دادند. در سال ۲۰۱۳ ال نشار با برخی از شرایط یک طراحی بهینه برای تولید ترکیب پیشنهادی آب و برق با توجه به ترمودینامیک و جنبه های

اقتصادی انجام داد. در سال ۲۰۱۳ خوش گفتارمنش و همکاران به بهینه سازی سیکل MED+RO پرداختند. قابل توجه است که از دیگ بخار در کار خود استفاده کرد. حلاج و همکارانش یک طراحی مفهومی از یک آب شیرین کن سلول سوختی جدید ارائه دادند. نتایج نشان می دهد قبل از ورود آب گرم به اسمز معکوس در سیستم گاز خروجی از پیل سوختی انرژی مورد نیاز آب شیرین کن ۸٪ کاهش می یابد. همچنین بازده سلول سوختی سیستم آب شیرین کن حرارتی در مقایسه با سلول سوختی و سیستم های آب شیرین کن حرارتی ۵,۶٪ افزایش می یابد. حسینی و همکارانش تحقیق بر روی بهینه سازی هزینه یک ترکیب قدرت و نمک زدایی آب با اگزرتیک و قابلیت اطمینان در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش ۱۴,۸٪ در راندمان اکسرژی کل اتفاق افتاده است. در سال ۲۰۱۲ شکیب و همکاران شیهه سازی و بهینه سازی یک سیستم MED به همراه بازیافت حرارتی ژنراتور بخار انجام دادند.



شکل ۲-۴ میکروساختار ویستینگهوس SOFC (۴۸)

عملکرد پیل سوختی اکسید جامد: هیدروژن و کربن مونوکسید به عنوان سوخت برای پیل اکسید جامد استفاده می شود. به منظور تامین اجزاء به سلول سوختی واکنش اصلاحی بخار همیشه برای اصلاح سوخت های هیدروکربنی مانند گاز طبیعی استفاده می شود. (رفرمر رابرای این انجام می دهیم که هیدروژن و مونوکسید به عنوان سوخت برای پیل تامین شود.) با توجه به دمای کاری بالای پیل سوختی اکسید جامد اصلاح بخار بسیار موثر است. به طور کلی پیل سوختی اکسید جامد از دو بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اصلاحی (بهبود) که در آنها اصلاح و بهبود می شود واکنش اتفاق می افتد و بخش سلول سوختی که واکنش های الکتروشیمیایی رخ می دهد. خوراک خارج مانند متان (گاز طبیعی) به بخش

هیدروژن و مونوکسید تبدیل می شود. در اصلاح خارجی واکنش اصلاح شده بخار آندوترمیک و واکنش سلول سوختی به طور جداگانه در واحدهای مختلف عمل می کند و هیچ گونه انتقال حرارتی بین ۲ واحد وجود ندارد. برای واکنش عملیاتی اصلاح مستقیم واکنش رفرمر در آند سلول سوخت انجام می شود. گرما و بخار به طور مستقیم از واکنش الکتروشیمیایی تامین می شوند که به واکنش اصلاح شده توسط حذف و استفاده از هیدروژن کمک می کند. مزیت اصلی این نوع عملیات این است که مصرف هیدروژن توسط واکن الکتروشیمیایی می تواند به طور مستقیم تولید متان را در قسمت آند افزایش دهد. بنابراین نتیجه اصلاح داخلی مستقیم تبدیل بالا و راندمان بالا می باشد. با این حال این نوع عملیات نیاز به یک ماده آند که خواص کاتالیزوری خوبی برای اصلاح واکنش و واکنشهای الکتروشیمیایی دارد. علاوه بر این تشکیل کربن در طرف آند می تواند باعث دمای کاری بالا و منجر به از دست دادن عملکرد سلول و دوام بد شود. برای عملیات اصلاح داخلی غیر مستقیم واکنش رفرمری در رفرمر صورت می گیرد که تماس حرارتی با سمت آند سلول نزدیک است. اصلاح داخلی غیر مستقیم مزیت انتقال حرارت خوب بین رفرمر و سلول سوختی را دارد. انتظار می رود انتقال حرارت بین این دو راکتور عملیات اتوترمال را فراهم می کند. با این حال برخلاف عملیات داخلی مستقیم به طور جداگانه عمل می کند. کاتالیزور برای اصلاح واکنش در بخش رفرمر و مواد برای واکنش الکتروشیمیایی در سمت آند از سلول سوخت می تواند متفاوت و به صورت جداگانه بهینه سازی شود. مشکل اصلی عملیات اصلاح داخلی عدم هماهنگی بین گرما است. نیاز به واکنش اصلاح بخار و گرمای موجود در بخش سلول سوختی مبرم است. عملیات رفرمر داخلی می تواند بخشی از ناحیه رفرمر باشد که می تواند منجر به شکست مکانیکی بدلیل تنش ناشی از گرما شود. یک مشکل اضافی مربوط به اصلاح داخلی مستقیم مربوط به رسوب کربن بر روی آند است که بدلیل واکنش ترک خوردگی رخ می دهد. شکل گیری کربن می تواند منجر به غیر فعال کردن مواد آند شود که منجر به از دست دادن عملکرد سلول های سوخت می شود. معایب بیشتر اصلاح داخلی در مقایسه با عملیات اصلاح خارجی عبارتند از: مواد و سوخت معمولی ممکن است بوسیله بعضی ناخالصی ها به عنوان مثال اجزاء گوگرد در سوخت تغذیه یا توسط تفت فلز فعال در دمای بالا مسموم شوند. علاوه بر این ادغام ترکیب بین واکنش الکترو شیمیایی و رفرمر می تواند انعطاف پذیری عملکرد سلول سوخت را کاهش دهد. این نگرانی در مقایسه اصلاح مستقیم و غیر مستقیم می باشد.

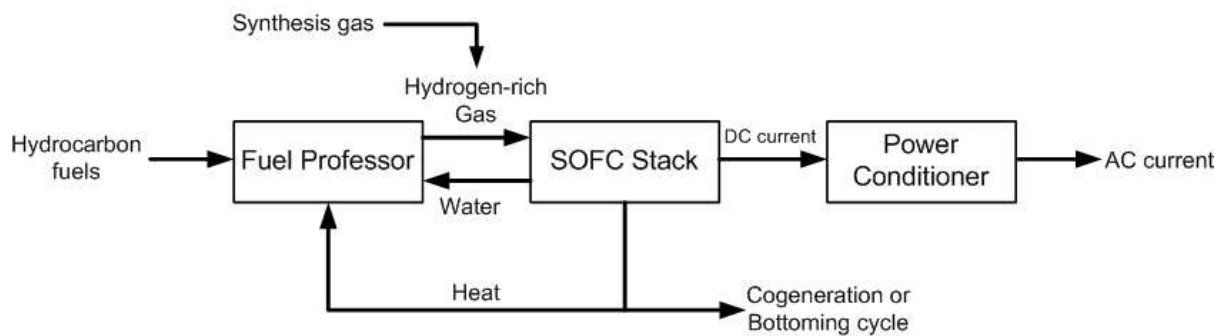
۷-۲ ابزار SOFC

به طور کلی سیستم پیل سوختی اکسید جامد برای تولید برق توزیع شده متشکل از سه بخش اصلی:

۱- یک پردازنده سوخت برای اصلاح سوختهای هیدروکربن به گاز غنی از هیدروژن است.

۲- یک پشته پیل سوختی اکسید جامد که از آن تولید برق می شود.

۳- یک قدرت تهویه مطبوع برای تبدیل جریان مستقیم به متناوب می باشد. از آنجا که ولتاژ سلولی با کاهش غلظت سوخت در پشته سلول کاهش می یابد. همکام سازی گرما با برق بطور فزاینده ای می تواند عملکرد سیستم را افزایش دهد. شکل زیر نمودار ساده ای از پیل سوختی اکسید جامد و اتصالات آن را نشان می دهد.



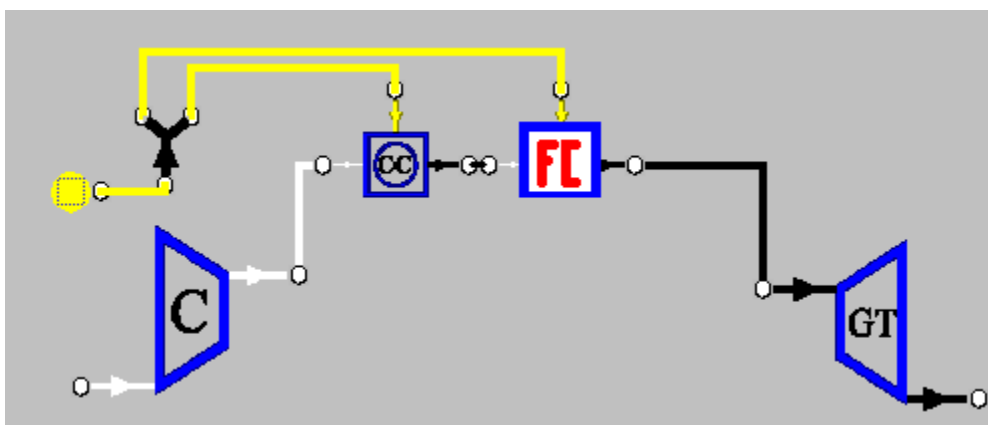
شکل ۷-۲. نمودار پیل سوختی اکسید جامد و اتصالات آن ها.

۸-۲ پیکربندی پیل سوختی اکسید جامد با توربین گازی

استفاده از یک توربین گاز در سیکل ترکیبی با SOFC شناخته شده است. بطور کلی میتوان توربین گاز را به دو روش مختلف به پیل سوختی اکسید جامد متصل کرد: ۱- غیر مستقیم. ۲- یکپارچه. در ابتدا مشعل توربین مشعل توربین گاز با یک مبدل حرارتی جایگزین می شود که در آن هوا از کمپرسور توسط اکسایش سلول سوختی گرم می شود. مبدل حرارتی باید در دما و فشار بسیار بالایی متفاوت عمل کند. هوای تحت فشار از کمپرسور به کاتد فرستاده می شود و واکنش می دهد. هیدروژن گاز رفرمر شده از طریق واکنشهای شیمیایی می باشد. سوخت واکنش نداده پس از خروج از آند با احتراق هوا در برنر (مشعل) می سوزد. اگر در دمای بالا برای حرکت دادن توربین گاز بعنوان یک چرخه پایینی تحویل داده می شود. مقدار باقی مانده از گاز خروجی می تواند به سایر قسمت های سیستم SOFC نیز منتقل شود. در این روش پیل با فشار بالا

عمل می کند. سیستم ترکیبی SOFC و سیستم توربین گازی می تواند راندمان الکتریکی کلی تا ۷۰٪ را بهبود بخشد. کارهای زیادی روی سیستم SOFC-GT انجام شده است. پالسون و همکارانش (۴۹) سیستم SOFC-GT را بررسی کردند که شامل بازیاب گاز قبل از اصلاح و بازیاب آند است. خروجی آند برای بازیابی بخار و گرما به اصلاح کننده خارجی بازیاب می شود. بقیه خروجی آند با هدر رفت کاتد در محفظه احتراق می سوزد. سپس گازهای گرم برای تولید برق اضافی به توربین گاز فرستاده می شود. در حالیکه گاز خروجی از توربین گازی برای پیش گرم کردن جریان خوراک سوخت استفاده می شود که تاثیر پارامترهای عملیاتی مانند فشار جریان هوا و سرعت جریان سوخت و دمای ورودی هوا بر عملکرد سیستم در کار آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نشان داده شده است که نسبت فشار تاثیر زیادی بر عملکرد سیستم دارد و راندمان الکتریکی بیش از ۶۵٪ در مقادیر کم فشار ممکن است. کوستاماگنا و همکارانش (۵۰) یک سیستم هیبریدی مبتنی بر اتصال یک توربین بادی میکرو گاز با راکتور سلولی سوخت اکسید جامد با درجه حرارت بالا را طراحی و اجرا کردند. نتایج نشان داد که سیستم هیبریدی راندمان حرارتی بیش از ۶۰٪ را در نقطه طراحی کردند و همیشه در شرایط بارگذاری بیش از ۵۰٪ ارایه می دهد. علاوه بر این سلیموویچ و پالسون (۵۱) ترکیبی از شبکه SOFC-GT متشکل از دو زیر مجموعه را تجزیه و تحلیل کردند که در آن خوراک سوخت به طور مرتب و سری و موازی تغذیه شده است. کوچنتارا و همکارانش (۵۲) با استفاده از آسپن پلاس سیستم تولید انرژی ترکیبی متشکل از پیل و توربین گازی را با احیای بخار و گرما ارزیابی کردند. مولر و همکارانش (۵۳) به بررسی و بهینه سازی سیستم هیبریدی با ترکیب پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی با و بدون ضبط کربن دی اکسید با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه ساز انجام دادند. کالیزور (۵۴) شبیه سازی انرژی بار کامل و جزئی را ارائه داد. تجزیه و تحلیل یک نیروگاه هیبریدی SOFC-GT در عملیات تمام بار حداکثر مقدار کارایی الکتریکی ۶۵,۴ بدست می آید. حاصلی و همکارانش عملکرد یک سلول سوختی اکسید جامد با دمای بالا در یک توربین گازی با گاز احیا کننده مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه سازی نشان داد که افزایش دمای ورودی توربین منجر به افزایش بازده حرارتی چرخه می شود در حالی که تولید خروجی خالص را بهبود می بخشد. افزون بر این افزایش دمای ورودی توربین یا نسبت فشرده سازی باعث افزایش میزان تولید آنتروپی می شود. و مقدار کارایی SOFC-GT ۲۷,۸٪ بالاتر از پلن توربین گازی است. در پیل های سوختی تبدیل انرژی به طور مستقیم با فرایند الکتروشیمیایی بدون واسطه به انرژی شیمیایی سوخت حاصل از انرژی گرمایی تبدیل می شود. از این رو پیل سوختی موضوع کارنونیست. بهره وری الکتریکی از پیل هاس ۴۰ تا ۶۰٪ هستند. یکی از انواع

پیل های سوختی پیل سوختی اکسید جامد است. که دارای دمای اپراتور بالایی در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد است. این عمل اجازه انجام پیل سوختی اکسید جامد با یک توربین گازی که تولید انرژی الکتریکی و گرمایی در چرخه های شکل زیر را می دهد.



شکل ۲-۶ چرخه هیبریدی ساده را نشان می دهد . (۵۵)

این چرخه های هیبریدی رقابتی برای چرخه های هیبریدی مرسوم شده ایجاد خواهد کرد که شامل توربین گازی و بهبود گرمای ژنراتور مولد بخار می باشد. زیرا بازده الکتریکی آنها در حدود ۷۰٪ می باشد. یک پیل سوختی دستگاه تبدیل انرژی می باشد که انرژی شیمیایی یک سوخت گازی به طور مستقیم به انرژی الکتریکی بدون نیاز به مرحله واسطه احتراق مستقیم تبدیل می شود. پیل سوختی اکسید جامد یک دستگاه تبدیل انرژی بسیار کارآمد است که انرژی شیمیایی را تبدیل به انرژی الکتریکی و حرارتی بطور مستقیم از سوخت از طریق واکنش های الکتروشیمیایی در الکتروود می باشد. سوخت می تواند گاز طبیعی مونوکسید کربن متانول و اتانول و ترکیبات هیدروکربن و همچنین هیدروژن است. یکی از مزیت های پیل سوختی اکسید جامد نسبت به سایر سلول های سوختی انعطاف پذیر است. ذبیحیان و همکارانش (۵۵) به مقایسه قدرت خروجی کار خالص و بهره وری از SOFC-GT سیستم هیبریدی با متان و انواع مختلفی از زیست توده ها دامن زده است. ذبیحیان (۵۶, ۵۷) بیشتر به بررسی اثر ترکیب سوخت بر عملکرد سیستم هیبریدی از منظر محتوای انرژی سوخت ورودی پرداخت. سوسپیتا (۵۸) به تجزیه و تحلیل کارایی الکتریکی یک سیستم هیبریدی بیومس SOFC-GT توسط دمیدن هوا اکسیژن و بخار توسط فرایند های گازی پرداخت. نتایج نشان داد که بازده الکتریکی از سه مورد سوخت پایین تر از متان خالص بود. روکنی (۵۹) نشان داد که بهره وری الکتریکی یک سیستم هیبریدی SOFC استرلینگ ۶۰٪ بوده است. با اندکی کاهش در فاکتور مصرف سوخت قدرت موتور استرلینگ افزایش پیدا کرد. نسل سوم سیستم ها که در آن

کمپرسور هوا و کمپرسور سوخت و مبدل حرارتی سوخت و هوا باهم مقایسه شده است. سیستم های پیل سوختی یک جایگزین مناسب برای سیستم های برق بطور خاص در مقیاس میکرو می باشد که با راندمان بالا و اثرات زیست محیطی کمتری است.

فصل سوم

مبانی نظری

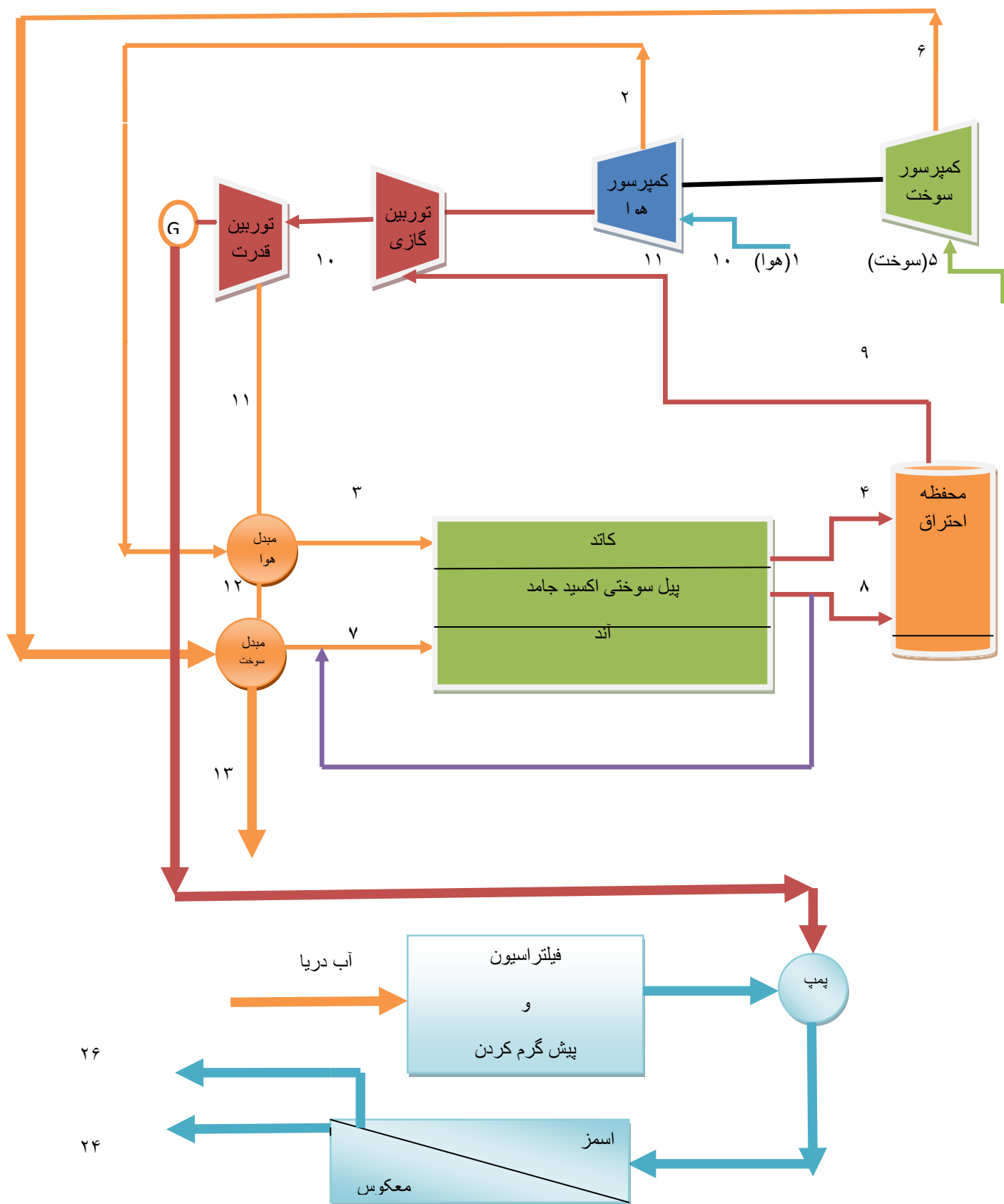
۳-۱- مقدمه

در این قسمت به نوع فرآیند و تحلیل کلی فرآیند همچنین به فرضیه ها پرداخت می شود. پروژه مورد نظر بر اساس یک سیستم هیبرید (ترکیبی) در نظر گرفته شده است. مزیت سیستم های ترکیبی تولید همزمان برق و حرارت می باشند. از آنجا که بدلیل گرمایش جهانی زمین و انتشار آلاینده ها وجود یک سیستم انعطاف پذیر و با آلایندگی بسیار پایین کمک بسزایی در حفظ امنیت زیست محیطی جهان خواهد کرد. سیستم کلی پیل سوختی سیستمی است که انتظار می رود یکی از محصولات انرژی الکتریکی جدید و با مشخصه های پیشرفته باشد که می تواند بهره وری بالایی از تبدیلات انرژی با کاهش انتشار آلاینده ها ارائه دهد. در پیل سوختی تبدیل انرژی به طور مستقیم با فرآیند الکتروشیمیایی بدون واسطه به انرژی شیمیایی سوخت حاصل از انرژی گرمایی تبدیل می شود. پیل های سوختی به طور کلی بر اساس دمای اپراتور ها طبقه بندی شده اند. یکی از انواع پیل های سوختی که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته و دلیل آن اینست که نسبت به سایر پیل های سوختی دارای انعطاف پذیری بیشتر و بازده (راندمان) بالاتری می باشد همچنین آلایندگی کمتری دارد. یکی دیگر از مزیت های قابل توجه پیل سوختی اکسید جامد اینست که در دمای بالا کار می کند و کارایی آن تحت فشار افزایش می یابد و بعنوان یک منبع گرما برای یک چرخه توربین گازی استفاده می شود.

۳-۲- توضیح فرآیند

ورودی ها و خوراک فرآیند شامل سوخت (متان و اتان) و هوا (اکسیژن و نیتروژن) که در قسمت پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز وارد می شود و آب دریا در قسمت اسمز معکوس بعنوان خوراک وارد سیستم می شوند. پیل سوختی شامل آند و کاتد و یک صفحه الکترولیت و یک الکتروود می باشد که در ادامه در مورد واکنش ها و روش فرآیند بیشتر توضیح داده خواهد شد. سیستم های آبی و توان (قدرت) یک از مهم ترین سیستم های نسل سوم می باشد که در آن کمپرسور هوا و کمپرسور سوخت و مبدل حرارتی سوخت و هوا در بر می گیرد. بهبود مستقیم یک پیل سوختی اکسید جامد مسطح شامل مبدل , مشعل (محفظه احتراق) توربین گازی و قدرت و در قسمت دیگر آن اسمز معکوس که شامل یک اسپیلتر برای جداسازی اولیه و یک پمپ فشار بالا و یک سیستم اسمزی می باشد. عناصر غشای فیلتر اسمز معکوس در لول هایی بسته شده اند. برای سادگی بیشتر یک مرحله پیش اصلاح نیز اضافه شده است (ضد عفونی و تنظیم PH و ...). فرایند شمتاییکی جریان دیاگرام سیستم نسل سوم پیل سوختی

اکسید جامد توربین گاز اسمز معکوس را نشان می دهد که حاصل پیل سوختی تولید انرژی الکتریکی و حاصل توربین گازی و توان تولید انرژی حرارتی و حاصل بخش اسمز معکوس آب شیرین کردن آب دریا (نمک زدایی) می باشد که در مجموع باعث افزایش راندمان کلی سیستم و بهره وری و کارایی بالا می باشد. همچنین مدل توربین گازی استفاده شده از نوع زیمنس مدل ۴۰۰ (SGT400) می باشد . با استفاده از سیستم پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی با اسمز معکوس نه تنها برق بلکه آب شیرین به اندازه کافی می تواند برای مناطق تولید شود . همچنین استفاده از راکتور های گیس در فرایند اجازه می دهد که شبیه سازی های واکنش اکسیداسیون و بهبود (رفرمر) هیدروکربن ها در یک واحد بررسی شود و وضعیت تعادلی خروجی را تنظیم می کند .دلیل استفاده از رفرمر خارجی این است که عملیات اصلاح رفرمر داخلی سبب عدم هماهنگی بین گرما می باشد . همچنین استفاده از فولاد ضد زنگ به عنوان اتصال مواد برای پیل سوختی اکسید جامد هزینه های تولید را کم می کند و امکان تجاری سازی سلول سوختی را فراهم می کند .



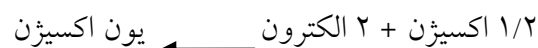
شکل ۳-۱ شماتیک سیستم هیبریدی SOFC-GT-RO را نشان می دهد .

سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی با خوراک ورودی گاز طبیعی و هوا سولفورده شده است. هوای محیط کمپرس (جریان ۱ به ۲) می شود که تقریباً بالاتر از فشار اپراتور پیل اکسید جامد پیش گرم می شود. در کمپرسور دما و فشار به شرایط کاری (هردو افزایش) میرسد. هوای محیط توسط کمپرسور متراکم شده و وارد مبدل حرارت می شود تا پیش گرم صورت گیرد. (جریان ۲ به ۳) قبل از اینکه وارد محفظه کاتد شود این پیش گرم شدن صورت می گیرد. خوراک گاز طبیعی بالاتر از فشار اپراتور پیل سوختی کمپرس می شود (جریان ۵ به ۶) و وارد محفظه آند می شود. در کمپرسور سوخت سوخت فشرده می شود و فشار خروجی بیشتر از فشار ورودی است. داخل بخش ریفرمینگ مخلوط غنی از هیدروژن تولید شده با اکسیژن واکنش الکترو شیمیایی می دهد و تولید جریان مستقیم برق می کند. جریان آند با سوخت گاز خروجی آند کنترل شده که برای تولید بخار مورد نیاز بازیاب می شود. همچنین سبب عدم رسوب کربن و عملکرد پیل سوختی مورد نظر را رضایت بخش می کند. سوخت باقی مانده در حضور اکسیژن اضافی توسط جریان آگروز کاتد احیا شده که منجر به احتراق می شود. گاز خروجی مشعل در توربین گازی منبسط می شود که به طور همزمان هوا و کمپرسورهای سوخت را می چرخاند. مزیت پیکربندی توربین گازی و قدرت برای فعال کردن دو شفت متغیر است. با استفاده از توان تولیدی در پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز میتوان پمپ فشار بالا در قسمت اسمز معکوس را تامین کرد. در قسمت اسمز معکوس خوراک مورد استفاده آب دریا بوده که برای شیرین سازی و تصفیه آب با کمک سیستم هیبریدی میتوان نمک زدایی انجام داد. در این مرحله خوراک وارد مرحله فیلتراسیون و پیش گرم شدن می شود تا برای انجام عمل اسمز معکوس وارد غشا شود سپس توسط شیر فشار شکن فشار سیستم به ۶۷,۸۴ پاسکال می رسد. همانطور که جریان فشار بالا از طریق غشاها عبور می کند که از عناصر کامپوزیتی نازک پلی آمید تجاری ساخته شده است در مرحله بعد وارد اسمز معکوس و غشای آن می شود و نمک و سایر پسماندها جداسازی می شود شوری پرمات نباید بیش از ۵۰۰ میلی گرم در لیتر برای مصرف آب آشامیدنی باشد. آب شیرین آمریکا به طور کلی کمتر از ۳۵۰ میلی گرم در لیتر می باشد. آب نمک در فشار جو به محیط زیست تخلیه می شود.

۳-۳ واکنش های فرایند

ناحیه کاتدی : هوا و یا اکسیژن وارد کاتد می شود و بخار به سمت برنر و جریان دیگر به سمت آند می رود. محصولات و گازهای غیر استفاده شده مثل اکسیژن مصرف نشده و بخار آب خارج می شود. ناحیه

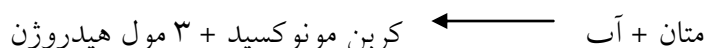
کاتدی شامل جداکننده و مخلوط کننده و یکسری تجهیزات مورد استفاده در این بخش می باشد. در واقع کاتد بعنوان یک جداساز متغیر برای اکسیژن طراحی شده است. الکترولیت بعنوان جریان کاتد متصل به آند که اکسیژن خالص از آن عبور می کند. ورودی کاتد هوا با دما و فشار بالا می باشد. دمای کلی کاتد ۱۱۱۳ درجه سانتیگراد و فشار آن ۰,۳ مگاپاسکال می باشد



ناحیه ریفرمینگ : از ۳ واکنش تشکیل شده است شامل واکنش ریفرمینگ که گرماگیر است و واکنش شیفتینگ که گرمازا می باشد و در نهایت واکنش کلی آن. در واکنش ریفرمینگ آنتالپی برابر است با ۲۰۶ کیلوژول بر کیلو مول و در واکنش شیفتینگ برابر است با ۴۱ کیلو ژول بر کیلو مول .

در این سیستم سوخت ریفرمینگ می شود .

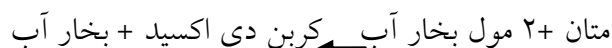
ریفرمینگ :



شیفتینگ :



واکنش کلی :



در بخش ریفرمر هدایت حرارت و بخشی از آب تولیدی به بهبود دهنده خارجی گرما و آ مورد نیاز را تامین می کند. سه عامل مهم در ریفرمر گرماگیری واکنش و افت فشار در تیوبها و انتقال حرارت می باشد. انرژی ریفرمر توسط گاز لوله بخار که از برنر می آید تامین می شود همچنین محاسبات انتقال گرما در ریفرمر انجام می شود. تبدیل گاز طبیعی به هیدروژن در حضور بخار متداول ترین و به صرفه ترین روش صنعتی تولید هیدروژن است. متان گرم شده و همراه با بخار آب فراسیر شده به راکتور راه می یابد سپس در حضور کاتالیزور انجام می شود. بازدهی خوب و ارزان بودن خوراک فرایند و گرماگیر بودن و تولید گاز دی اکسید کربن از جمله ما حاصل فرایند می باشد. هیدروژن و کربن مونوکسید بعنوان سوخت برای

پیل سوختی اکسید جامد استفاده می شود بمنظور تامین این اجزاء به سلول سوختی واکنش اصلاحی بخار برای اصلاح سوخت های هیدروکربنی مانند متان و اتان استفاده می شود با توجه به دمای بالای پیل اصلاح بخار بسیار موثر و مهم است . در این پروژه از ریفورمر خارجی استفاده می شود چون در ادغام ریفورمر و پیل الکتروشیمیایی ممکن است رسوب کربن ایجاد شود که انعطاف پذیری پیل را کاهش می دهد . و بین دو ریفورمر داخلی مستقیم و غیر مستقیم ریفورمر مستقیم داخلی بهینه تر است .

۳-۴ ناحیه آند

از کاتد اکسیژن وارد آند می شود . سوخت وارد آند می شود و طی واکنش های زیر سوخت مصرف نشده و آب خارج می شود .

متان + ۴ مول اکسیژن \rightleftharpoons ۲ مول بخار آب + دی اکسید کربن + ۸ الکترون

۲ مول اتان + ۵ مول اکسیژن \longrightarrow ۶ مول بخار آب + ۴ مول کربن دی اکسید

کربن مونوکسید + یون اکسیژن \longrightarrow کربن دی اکسید + ۲ الکترون

هیدروژن + یون اکسیژن \longrightarrow آب + ۲ الکترون

واکنش کلی پیل سوختی اکسید جامد :

هیدروژن + نیم مول اکسیژن \longrightarrow آب + انرژی

۳-۵ ناحیه مشعل (برنر یا محفظه احتراق)

واکنش این بخش گرمازا بوده همچنین گازهای خروجی از پیل مانند بخار آب و کربن دی اکسید و متان و اتان و کربن مونوکسید واکنش نداده وارد محفظه احتراق می شوند و جهت بالا بردن دمای گاز می سوزد.

هیدروژن + نیم مول اکسیژن \longrightarrow بخار آب

کربن مونوکسید + نیم مول اکسیژن \longrightarrow کربن دی اکسید

متان + ۲ مول اکسیژن \longrightarrow کربن دی اکسید + ۲ مول بخار آب

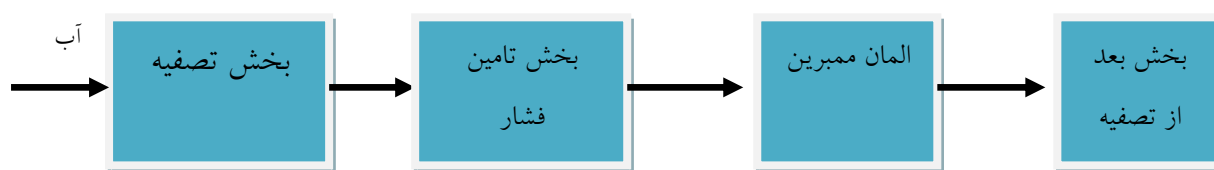
اتان + ۴ مول اکسیژن \longrightarrow ۲ مول کربن دی اکسید + ۴ مول بخار آب

محفظه احتراق در فشار ثابت می باشد . پیل سوختی مورد استفاده از نوع صفحه ای می باشد چون نسبت به لوله ای توان بیش تر و هدایت کوتاه تر و قیت کم تری دارد .

۳-۶ چرخه توربین گازی

شامل کمپرسورهای سوخت و هوا و یک اتاق احتراق و یک توربین گازی و قدرت و دو احیا کننده است که گاز خروجی پس از سوخت را بازیابی می کند . و هوای توربین گازی و سوخت در آن جریان دارد.

در مورد اسمز معکوس نیز غشای آن از جنس پلی آمید بوده و طبق شماتیک زیر عمل می کند



۳-۷ ویژگی های عمده ی غشاهای اسمزی

۱- معمولا از جنس استات سلولز یا پلی فنیل اکسید و یا پلی آمید می باشد.

۲- در مقابل عوامل شیمیایی یا بیولوژیکی مقاوم هستند .

۳- قدرت تحمل فشار بالایی دارند .

۴- در برابر تغییرات اسیدی بازی مقاوم هستند .

همچنین شوری آب ۴۴,۴۲۸ میلی گرم در لیتر در شرایط خاورمیانه است . مناطق نیاز به چنین سیستم های : شهرستان بشاگرد واقع در جنوب ایران (حومه خلیج فارس) و پاکدشت تهران و همچنین مناطق مرکزی ایران و نزدیک به دریا و حومه رودخانه ها برای استفاده از آب شیرین کن .

۳-۸ فرضیه های پروژه

۱- دمای کاتد و آند براساس مرجع خروجی قرار داده شده است .

۲- عملکرد حالت مانند گاز برای همه اجزاء در نظر گرفته شده بدین معنی که تجمع انرژی و جرم در کل سیستم از طریق زمان وجود ندارد . علاوه بر این در مورد سینتیک الکتروود و حالت پایدار.

۳- خلل و فرج الکتروود وجود ندارد و محصولات از واکنش انتقال به داخل از الکتروود ها در همان زمان در واکنش اتفاق می افتد .

۴- گاز طبیعی متان و اتان خالص فرض می شود .

۵- حرارت به محیط اطراف ریفرمر و استک سلول سوختی و مشعل تلف نمی شود.

۶- مبدل حرارتی مخلوط کن و کمپرسور و توربین گازی آدیاباتیک است . از اینرو هیچ انتقال حرارت بین سیستم و محیط وجود ندارد .

۷- مهاجرت الکتروود در نظر گرفته نشده است.

۳-۹-۹ آنالیز های اگزرژی

۳-۹-۱ مبانی و تعاریف تحلیل اگزرژی

تحلیل اگزرژی، بر پایه قانون اول و دوم ترمودینامیک، از اوایل قرن گذشته مورد توجه واقع شده و از سال ۱۹۳۰ میلادی، این تحلیل بسط و توسعه بیشتری نموده است . با شروع بحران انرژی در دهه ۷۰ میلادی، تحلیل اگزرژی در رأس تحقیقات ترمودینامیکی سه دهه اخیر قرار گرفت . بر طبق قانون دوم ترمودینامیک در هر فرآیند واقعی، آنتروپی تولید شده متناسب با از دست رفتن اگزرژی و نابودی آن در طی فرآیند، می باشد. بنا بر تعریف، اگزرژی حداکثر کار مفیدی است که از مقدار مشخصی از انرژی موجود یا از جریانی از مواد، حاصل می شود . در تحلیل اگزرژی، هدف اساسی تعیین محل و مقدار تولید بازگشت ناپذیری ها در طی فرآیندهای مختلف سیکل ترمودینامیکی و عوامل مؤثر بر تولید این بازگشت ناپذیری می باشد.

تعریف اگزرژی

اگر ماده، ضمن یک فرآیند بازگشت پذیر از حالت اولیه خود به حالت مرده برسد، در این صورت حداکثر کار بازگشت پذیر به دست می آید که آن را اگزرژی یا قابلیت انجام کار ماده می نامند.

حالت مرده

حالت مرده، به حالتی از ماده گفته می شود که در آن حالت، ماده با محیط در تعادل حرارتی، مکانیکی و شیمیایی باشد. در حالت مرده، دمای ماده برابر با دمای محیط و فشار ماده برابر فشار اتمسفر و سرعت ماده نسبت به محیط، صفر و انرژی پتانسیل آن نیز صفر است.

حالت مرده محدود

حالت مرده محدود، به حالتی گفته می شود که در آن ماده با محیط در تعادل حرارتی و مکانیکی بوده، سرعت و انرژی پتانسیل آن صفر باشد. هر چند ممکن است تعادل شیمیایی بین ماده و محیط برقرار نباشد.

تعریف محیط از دیدگاه تحلیل انرژی

از دیدگاه تحلیل انرژی، محیط جسم بزرگی است که در تعادل ترمودینامیکی کامل قرار دارد و در آن هیچ گونه گرادیانی اعم از فشار، دما و پتانسیل شیمیایی وجود ندارد و بدست آوردن کار از برهم کنش اجزای مختلف آن با یکدیگر غیر ممکن است. هر سیستمی که خارج از محیط باشد، دارای حداقل یک پارامتر متفاوت با محیط است و از برهم کنش آن سیستم و محیط، امکان بدست آوردن کار وجود دارد. بنابراین، محیط جسم مرجعی است که برای ارزیابی پتانسیل کاردهی سیستمهای مختلف، به کار گرفته می شود.

انرژی غیرجریانی

اگر ماده ای از یک حالت اولیه معین، طی یک فرآیند بازگشت پذیر که در یک سیستم بسته صورت می گیرد، در حالتی که تنها با اتمسفر تبادل حرارت نماید، به حالت مرده خود برسد، در این صورت مقدار کار بازگشت پذیر، حداکثر شده که این مقدار را اصطلاحاً انرژی غیرجریانی ماده می گویند این حالت:

$$\varphi = u - u - T s - s + P v - v \quad (1-3)$$

φ ، نشانگر انرژی غیرجریانی می باشد.

انرژی جریانی

اگر ماده ای از یک حالت اولیه معین، طی یک فرآیند حالت پایا جریان پایای بازگشت پذیر، در حالتی که تنها با اتمسفر دارای تبادل حرارتی است، به حالت مرده خود برسد، مقدار کار بازگشت پذیر، حداکثر شده و این مقدار اصطلاحاً انرژی جریانی ماده نامیده می شود.

$$\varphi = h - h - T s - s + Vel + gz \quad (2-3)$$

اگرژی جریان پایا و مؤلفه های آن

اگرژی نیز مانند انرژی، دارای مؤلفه های مختلفی است. در غیاب اثرات میدانهای هسته ای، مغناطیسی، الکتریکی و کشش سطحی، می توان رابطه زیر را برای کل اگرژی نوشت :

$$Ex_Q = Ex_K + Ex_P + Ex_{PH} + Ex_{CH} + Ex_{DI} \quad (3-3)$$

اگرژی فیزیکی یا ترمومکانیکی (Ex_{ph})، اگرژی پتانسیل (Ex_p)، اگرژی جنبشی (Ex_k) که در آن اگرژی شیمیایی می باشد (Ex_{ch}). اگرژی انتقال حرارت (Ex_Q)، اگرژی دیفیوژنی (Ex_{DI})

اگرژی جنبشی

اگرژی جنبشی، جزء انرژیهای سامان یافته می باشد. یعنی در تبدیل انرژی می تواند از رابطه زیر به دست می آید و به کار (اگرژی) تبدیل شود همچنین اگرژی جنبشی به جرم m می باشد

$$Ex_K = 1/2 m V^2 \quad (3-4)$$

اگرژی پتانسیل

اگرژی پتانسیل نیز مانند اگرژی جنبشی، جزء انرژیهای سامان یافته می باشد. اگرژی قرار دارد، از رابطه زیر به Z که نسبت به یک حالت مرجع، در ارتفاع m پتانسیل ماده ای به جرم دست می آید

$$Ex_P = mgz \quad (3-5)$$

اگرژی ترمومکانیکی

اگرژی ترمودینامیکی، ماکزیمم کار قابل دستیابی از ماد های است که از حالت اولیه خود ضمن یک فرآیند کاملاً برگشت پذیر که فقط تبادل حرارتی با محیط دارد، به حالت مرده محدود برسد که مقدار آن از این رابطه بدست می آید.

اگرژی هر قسمت از واحد های فرایند در ذیل آمده است :

مبدل هوا و سوخت: تخریب اگرژی و بازده اگرژی برای مبدل هوا و سوخت به صورت زیر می باشد :

$$Ex = m_i(ex_{i,1} - ex_{i,2}) - m_3(ex_{o,1} - ex_{o,2}) \quad (3-6)$$

$$\eta_{ex} = m_{i,1}(ex_{i,1} - ex_{i,2}) / m_{i,2}(ex_{o,2} - ex_{o,1}) \quad (3-7)$$

$$E_{D, AC} = E_i - E_o + W_{AC} \quad (3-8)$$

$$\eta_{ex} = m_1 (ex, 2 - ex, 1) / W_{AC} \quad (9-3)$$

با توجه به تعادل جرمی نرخ کلی آنتروپی به صورت زیر محاسبه می شود :

$$S_{gen,} = m_1 (s_2 - s_1) - m_3 (s_3 - s_4) \quad (10-3)$$

$S_{gen,APH}$ و $Ex_{,H}$, $\eta_{ex,APH}$ به ترتیب بازده اگزرژی و تخریب اگزرژی و انتروپی کلی می باشد .
بازده بر حسب درصد و تخریب بر حسب کیلو وات و آنتروپی بر حسب کیلووات بر درجه سانتیگراد
می باشد و برای تمامی واحد های زیر نیز به همین ترتیب می باشد.

توربین گازی :

با توجه به ورودی ها و خروجی های توربین بر حسب زیر بازده اگزرژی و تخریب آن محاسبه می شود:

$$Ex_{,,} = m_1(ex_{,1} - ex_{,2}) - W_{GT} \quad (11-3)$$

$$\eta_{ex} = W_{GT} / m_1 (ex, 2 - ex, 1) \quad (12-3)$$

نرخ آنتروپی کل سیستم بر حسب زیر محاسبه می شود :

$$S_{gen} = m_5 (s_2 - s_1) \quad (13-3)$$

$S_{gen,k}$, $Ex_{,,}$, $\eta_{ex,GT}$ بترتیب بازده اگزرژی و تخریب اگزرژی و آنتروپی کلی می باشد.

۳-۱۰ توربین توان (قدرت)

بازده اگزرژی و تخریب اگزرژی و آنتروپی سیستم طبق معادلات زیر محاسبه شده است :

$$Ex_{,,} = m_1(ex_{,1} - ex_{,2}) - W_{PT} \quad (14-3)$$

$$\eta_{ex} = W_{PT} / m_1 (ex, 1 - ex, 2) \quad (15-3)$$

$$S_{gen} = m_1 (s_2 - s_1) \quad (16-3)$$

$$E_{G,DT} = E_I - E_O - W_{GT} \quad (۱۷-۳)$$

۳-۱۱ محفظه احتراق

گازهای خروجی از سلول سوختی و متان استفاده نشده وارد محفظه احتراق می شوند . دو جریان اگزرژی وارد و دو جریان اگزرژی خارج می شود.

$$Ex_{,,} = m_1 ex_{,1} + (m_{f,FC}(1 - U_f) + m_{f,CC})echf - m_2 ex_{,2} - (1 - T_0/T_{sink})Q_{Loss} \quad (۱۸-۳)$$

$$\eta_{ex,} = m_5 ex_{,5} - m_1 ex_{,1} / m_{f,FC}(1 - U_f)echf + m_{f,CC}(ephf + echf) \quad (۱۹-۳)$$

$$\text{Mixer } E_{D,MIX} = E_5 + E_9 - E_6 \quad (۲۰-۳)$$

۳-۱۲ سلول سوختی اکسید جامد

استک سلول سوختی دارای دو سیال ورودی (سوخت و هوا) و دو سیال خروجی (محصولات واکنش و توان خروجی) است . بازده اگزرژی و اتلاف آن بر حسب ذیل می باشد :

$$Ex_{,,} = m_1 ex_{,1} + m_{fuel,FC} U_f echf - m_2 ex_{,2} - W_{FC,dc} \quad (۲۱-۳)$$

$$\eta_{ex,} = W_{FC} / m_{fuel,FC} U_f echf + (m_1 ex_{,1} - m_2 ex_{,2}) \quad (۲۲-۳)$$

اگزرژی شیمیایی به صورت ذیل است :

$$echf = 1.06 \times LHV \quad (۲۳-۳)$$

$$E_{X,FUEL} / LHV_{FUEL} \quad (۲۴-۳)$$

که برای متان و هیدروژن ۱,۰۶ و ۰,۹۸۵ می باشد.

کمپرسور : برای کمپرسور سوخت و هوا تخریب انرژی و بازده آن طبق ذیل می باشد :

$$E_{XD,P} = E_{Xi,P} - E_{O,P} + W_P \quad (25-3)$$

$$\eta_{ex,P} = (E_{Xi,P} - E_{XO,P}) / W_P \quad (26-3)$$

۳-۳ پمپ

بازده انرژی و اتلاف آن طبق ذیل محاسبه می شود :

$$E_{ex,p} = E_{X,P} - E_{X,O,P} / W_P \quad (27-3)$$

$$E_{XD,P} = E_{XD,P} - E_{X,OP} + W_P \quad (28-3)$$

۳-۴ راندمان انرژی کل

$$\eta = E_{OUT} / E_{XIN} = 1 - (E_{X,DEST} / E_{X,IN}) \quad (29-3)$$

۳-۵ بالانس انرژی سیستم

$$M_1 e_{x,1} + m_{fuel}(e_f^{ph} + e_f^{ch}) - m_8 \cdot e_{x,8} - w_{net} - e_{x,sest} = 0 \quad (30-3)$$

۳-۶ انرژی فیزیکی

انرژی فیزیکی برای آب و هوا و محصولات احتراق به صورت زیر می باشد :

$$E_{xph} = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (31-3)$$

۳-۷ بالانس انرژی در حالت پایا

$$\sum (1 - T_0/T_n) Q_n + (\sum n E_{xph,ch})_{in} = (\sum n E_{xph,ch})_{out} + W + Exd \quad (32-3)$$

که W نرخ انرژی کار انتقال شده به سیستم و Ex_d تخریب انرژی سیستم و T_0 و P_0 دما و فشار محیط می باشند .

– انرژی فیزیکی و شیمیایی مخلوط

$$Ex_{ph,ch} = Ex_{ph} + Ex_{ch} \quad (3-33)$$

انرژی فیزیکی :

$$Ex_{ph} \approx m [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (3-34)$$

انرژی شیمیایی مخلوط گاز ایده ال :

$$Ex_{ch,mix} = \sum n_i n_i ex_{chi} + R T_0 \sum n_i n_i \ln y_i \quad (3-35)$$

انرژی شیمیایی جریان های سوختی هیدرو کربن :

$$Ex_{ch} = \gamma_f m_f LHV_f \quad (3-36)$$

γ_f فاکتور رشد انرژی سوخت می باشد. از انرژی جنبشی و پتانسیل صرفه نظر شده است.

انرژی مخصوص یزای جریان های آب شور (نمک) و آب تصفیه شده و فاضلاب به صورت ذیل می باشد :

$$ex_{ph,h} = (h - h_*) - T_0 (s - s_*) + \sum n_i = 1 w_i (\mu_{*i} - \mu_{0i}) \quad (3-37)$$

که h و s و μ و W آنتالپی مخصوص و آنتروپی مخصوص و انرژی پتانسیل شیمیایی و ضریب جرمی باشد.

– انرژی مخصوص سیستم ممبرین اسمز معکوس

$$RO = W_{min} W_{act} \quad (3-38)$$

۳-۱۴ آنالیز اگزورژو اقتصادی

روش های پیشرفته برای طراحی سیستم های انرژی با هزینه های مناسب از مهمترین چالش های پیش روی مهندسين انرژی است و نیاز به توسعه ی طراحی سیستم های انرژی با رویکرد کاهش اثرات مخرب زیست محیطی بیشتر احساس می شود. ترکیب قانون دوم ترمودینامیک با نگرش های اقتصادی ابزاری قدرتمند برای مطالعه و بهینه سازی سیستم های انرژی است. بسیاری از محققان راهکارهای مناسبی به منظور تحلیل اقتصادی بر مبنای مفاهیم انرژی با نام هایی همچون ترمواکونومیک، قیمت گذاری قانون دوم و اکسرژو اکونومیک (اکسرژی اقتصادی) ارائه کرده اند. برای بررسی اکسرژی اقتصادی برای هر جز یک معادله تعادل هزینه محاسبه می شود. معادله تعادل هزینه برای اجزای یک سیستم K بیان می کند که مجموع نرخ هزینه های جریان های خروجی (O) اکسرژی با مجموع نرخ هزینه های جریان های ورودی (i) به علاوه ی هزینه سرمایه گذاری و هزینه های عملیاتی و نگهداری تجهیزات برابر است با (رابطه ی زیر)

$$\sum_o C_{o,k} + C_{w,k} = C_{q,k} + \sum_i C_{i,k} + Z_k \quad (39-3)$$

$$C_j = c_j Ex_j \quad (40-3)$$

در این رابطه C هزینه بر واحد هر جریان اکسرژی است. $C_{q,k}$ و $C_{w,k}$ به ترتیب نرخ هزینه ی توان خروجی از اجزای سیستم و نرخ انرژی گرمایی ورودی به اجزای سیستم را نشان می دهد. در این معادله هیچ ترمی که مستقیماً نشان دهنده ی نرخ تخریب اکسرژی باشد وجود ندارد، به همین دلیل هزینه نرخ تخریب اکسرژی از ترکیب معادله ی تعادل اکسرژی و معادله ی اکسرژی اقتصادی رابطه ی زیر به دست می آید.

$$Ex_{F,K} = Ex_{P,K} + Ex_{D,K} \quad (41-3)$$

$$C_{F,K} = c_{F,K} Ex_{D,K} \quad (42-3)$$

$$C_{P,K} = c_{P,K} Ex_{D,K} \quad (43-3)$$

$E_{xP,K}$ نشان دهنده ی نرخ اکسرژی خوراک، $E_{xP,K}$ نرخ اکسرژی محصول و $E_{xD,K}$ نرخ اکسرژی تخریبی است. برای حل معادلات تعادل هزینه و تعیین نرخ اکسرژی هر یک از اجزای سیستم باید هزینه ی هر یک از اجزای سیستم معلوم باشد. ترم Z_K در معادله (۳) مجموع نرخ هزینه های سرمایه گذاری، عملکرد و نگهداری هر یک از اجزای سیستم است و از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$Z_K = Z_K^{CI} + Z_K^{OM} \quad (۴۴-۳)$$

نرخ هزینه ی سرمایه گذاری سالانه برای هر یک از اجزای سیستم توسط معادله زیر به دست می آید.

$$Z_K^{CI} = \left(\frac{CRF \times \phi}{3600N} \right) Z_K \quad (۴۵-۳)$$

CRF ، N و ϕ به ترتیب نشان دهنده ی ضریب بازگشت سرمایه، تعداد ساعت های عملکرد دستگاه و ضریب نگهداری است که مقدار آن ۱/۰۶ است.

CRF وابسته به نرخ بهره و عمر تخمین زده تجهیزات است که از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$CRF = \frac{i_r(1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1} \quad (۴۶-۳)$$

که i_r نرخ سود سالیانه و n تعداد سال های عملکرد مفید دستگاه است.

نرخ هزینه عملکرد و نگهداری سالانه برای هر یک از اجزای سیستم با استفاده از معادله زیر محاسبه می شود.

$$Z_K^{OM} = \gamma_K Z_K + \omega_K E_{xP,K} + R_K \quad (۴۷-۳)$$

که γ_K و ω_K به ترتیب مقادیر ضرایب مربوط به هزینه های عملکرد و نگهداری ثابت و متغیر است. R_K شامل تمامی هزینه های عملکردی و نگهداری متفرقه است که مستقل از هزینه های سرمایه گذاری و

اکسرژی است. اقتصاد اگزرتیک ترکیبی از قواعد تجزیه و تحلیل اقتصادی و اگزرژی در سطح یک جزء در سیستم های تبدیل انرژی است. اگزرتواکونومیک یک روش مهم و مفید برای تجزیه و تحلیل سودمندی سیستم های مختلف تبدیل انرژی است و اطلاعاتی را که به صورت جداگانه در دسترس نیستند، توسط تجزیه اکسرژی و یا اقتصادی ارائه نمی شود. در واقع، تعیین هزینه واحد محصولات، هدف نهایی در تجزیه و تحلیل اگزرتواکونومیک است. تجزیه و تحلیل اگزرتواکونومیک بر اساس اصول تجزیه و تحلیل اگزرژی و اقتصادی در سطح اجزای سیستم است. تجزیه و تحلیل اگزرتواکونومیک ترکیبی از تجزیه و تحلیل اگزرژی با اصول اقتصادی است. در مقایسه با تجزیه و تحلیل های گسترده و اقتصادی به طور جداگانه، این ترکیب اطلاعات اضافی را فراهم می کند. هدف اصلی این است که به حداقل رساندن هزینه های محصول کلی. همچنین می تواند به درک اینکه چگونه هزینه ها در سراسر سیستم های تبدیل انرژی پیچیده توزیع می شود کمک می کند.

$$Zk = Zk \text{ CRF} / 3600 \text{ N} \quad (48-3)$$

که Zk, CRF و N به ترتیب فاکتور بازیابی سرمایه و قیمت سرمایه و ساعات کار سالانه می باشد. CRF نسبت سالانه ثابت به ارزش فعلی دریافت آن سال در طول عمر سرمایه گذاری، n ، با نرخ بهره i می باشد.

$$\text{CRF} = (1 + i)^n / (1 + i)^n - 1 \quad (49-3)$$

نرخ هزینه سوخت بر اساس هزینه واحد گاز طبیعی، به صورت زیر ارزیابی می شود :

$$Cf = cf \text{ LHV } mf \quad (50-3)$$

پارامترهای اگزرتواکونومیک

متوسط قیمت اگزرژی در واحد سوخت $C_{f,k} = c_{f,k} / E_{f,k}$

متوسط قیمت اگزرژی در واحد محصولات $C_{p,k} = C_{p,k} / E_{p,k}$

قیمت تخریب اگزرژی $C_{d,k} = E_{f,k} \cdot E_{D,K}$

نسبت تفاوت قیمت $r_k = (C_{p,k} - C_{f,k}) / C_{f,k}$

فاکتور اگزرژی اکونومیک $f_k = Z_k / (Z_k + C_{f,k})(E_{D,K} + E_{l,k})$

متوسط قیمت اگزرژی در واحد سوخت C_f :

C_p : متوسط قیمت انرژی در واحد محصولات

C_d : قیمت تخریب انرژی

Z : قیمت سرمایه گذاری

R : نسبت تفاوت قیمت

F : فاکتور انرژی اکنومیک

۳-۱۵ انرژی محیط زیستی (انرژی و اینورمنتال)

امروزه جنبه های زیست محیطی سیستم های تولید برق یکی از مهم ترین مسائل است که باید مورد توجه قرار گیرد. قوانین زیست محیطی سال به سال سخت تر می شوند، بنابراین در هنگام تجزیه و تحلیل این سیستم ها باید در نظر گرفته شود تا اثرات زیست محیطی واحدهای تولید انرژی مورد توجه قرار گیرد. بر این اساس، میزان انتشار CO ، NO_x و CO_2 . گرمایش جهانی و مسائل زیست محیطی در سال های اخیر دغدغه فراوانی شده است که نیازمند بررسی تاثیرات محیطی سیستم های انرژی در فرایند طراحی است. بر این اساس، CO ، NO_x و CO_2 به عنوان عوامل مهمی در نظر گرفته می شود و هزینه های معادل هزینه های اجتماعی آنها با کل هزینه های چرخه خلاصه می شود. داده های گزارش شده از چندین آزمایش نشان می دهد که مقدار مونوکسید کربن و اکسید نیتروژن تولید شده در پشته SOFC ناچیز است. مقدار تولید CO و NO_x در محفظه احتراق، بر اساس زمان اقامت در منطقه احتراق (t) و درجه حرارت احتراق اولیه منطقه (T_{pz}) می تواند توسط رابطه زیر بدست آید:

$$M_{CO} = 0.15 * 10^9 * \exp(7800/T_{pz}) / P^2 * t (\Delta P/p)^{0.5} \quad (۵۱-۳)$$

$$M_{NOx} = 0.15 * 10^6 * t^{0.5} * \exp(-71100/T_{pz}) / p^{0.5} (\Delta P/p)^{0.5} \quad (۵۲-۳)$$

که تغییرات P نشان دهنده افت فشار غیر مستقیم در محفظه احتراق می باشد.

در ارزیابی exergo-environmental اثرات زیست محیطی در ارتباط با یک جزء و جریان های سوخت آن به وسیله یک مدل exergoenvironmental به جریان های اضافی تولید محصول اختصاص می یابد. متغیرهای محیطی Exergo محاسبه می شوند.

تعادل تاثیر زیست محیطی برای چرخه می تواند به شرح زیر بیان شود:

$$B_A + B_F + Y = B_G + B_C + B_W + B_L \quad (۵۳-۳)$$

و یا بصورت دقیق تر :

$$B_A E_{XA} + B_F E_{XF} + Y = B_G E_{XG} + B_C E_{XC} + B_W E_{XB} + B_L E_{XL} \quad (54-3)$$

برای نوشتن معادله تعادل هزینه برای هر جریان در سیستم، یک پارامتر به نام نرخ هزینه جریان تعریف میشود.

$$C_{Q,k} + X_i C_{i,k} + Z_k = X_{e,k} + C_{e,k} + C_{W,k} \quad (55-3)$$

$$C_J = C_J E_{XJ} \quad (56-3)$$

$$Z_K = Z_k \cdot CRF \cdot W/N \cdot 3600 \quad (57-3)$$

جایی که عامل ضریب نگهداری است که معمولاً ۱,۰۶ است، N سالانه تعداد ساعات کاری واحد است، Z_k خرید اجزای k است و CRF عامل بازپرداخت سرمایه است. عامل بازپرداخت سرمایه یک تابع بستگی به نرخ بهره و مدت زمان نگهداری تجهیزات دارد

$$CRF = I(1+I)^N / (1+i)^n - 1 \quad (58-3)$$

جایی که i نرخ بهره است و n کل دوره عملکرد سیستم در سال است.

فصل چهارم

تحلیل نتایج شبیه سازی

۴-۱ مقدمه

شبیه سازی در واقع تبدیل کیفیت های فیزیکی و رابطه متقابل این کیفیت ها به کمیت های عددی و روابط ریاضی است. بدین ترتیب یک مدل ریاضی شامل متغیرها و مجموعه معادلات وابسته به آنهاست که می تواند تاثیر متقابل این متغیرها را، همانطور که در دنیای واقعی اتفاق می افتد نشان دهد. از این رو شبیه سازی فرآیندها، وسیله بسیار مناسبی در دست تحلیل گری است که با توسل به آن می تواند رفتار یک سیستم را پیش از اعمال واقعی تغییرات پیش بینی کند. این خاصیت بخصوص در مورد سیستم هایی که امکان اعمال واقعی تغییرات در آنها محدود است، بسیار مفید و کار آمد است. مدل ها غالبا به سه دسته تئوری، نیمه تئوری و تجربی تقسیم می شوند. مدل تئوری به طور کامل بر اساس قوانین تئوری استوارند در صنعت کاربرد کمتری را دارد. مدل های نیمه تجربی برپایه روابط تئوری و با استفاده از نتایج اصلاحات تجربی بوجود می آیند. معادلات حالت از این دسته اند. مدل های تجربی صرفا بر اساس روابط تجربی شکل گرفته اند. با اینکه محدود کردن شرایط تعادل به تعادل فازها و حذف واکنش های شیمیایی به میزان زیادی از پیچیدگی این مجموعه معادلات کلی می کاهد، با این همه حل این معادلات تنها با توسل به روش های پیچیده محاسبات عددی و بهره جویی از امکانات محاسبات کامپیوتری امکان پذیر است. برنامه های شبیه سازی فرآیند در واقع بسته نرم افزاری هستند که تشکیل و حل این معادلات را مقدور می سازند به عبارت دیگر شبیه سازی عبارت است از بکار گیری مدل ها و ایجاد ارتباط بین آنها برای توصیف عملی و علمی شرایط و حالات یک سیستم و تعیین خروجی های آن با توجه به داده های ورودی، لذا تکرار شبیه سازی در حالت و شرایط مختلف ورودی می تواند ما را در طراحی فرآیند یاری کند. آنچه مسلم است این دقت و میزان انحراف نتایج تجربی است که ضامن اعتبار و اهمیت یک مدل یا یک شبیه ساز است.

مهمترین موارد کاربرد شبیه سازها در بررسی عملکرد، رفع تنگناها و مشکلات فرآیندی، ایجاد تغییرات در شرایط عملیاتی و پیش بینی نتایج حاصل از آن می باشد در بعضی موارد می توان از شبیه سازها برای انجام و بررسی آزمایشات پیچیده که تکرار آنها در عمل مستلزم وقت و هزینه بسیار زیاد است سود برد. ازدیادگر موارد کاربرد شبیه سازی، افزایش مقیاس واحدهای آزمایشگاهی می باشد که موجب حذف مرحله ساختن واحد نیمه صنعتی می گردد. از این روست که در سال های اخیر شبیه سازهای بسیاری در غالب بسته های نرم افزاری تهیه و به بازار عرضه شده اند. به کمک این نرم افزارها می توان حتی در واحدهای پیچیده ای چون پالایشگاه ها را به منظور طراحی، توسعه، بهبود عملیات و رفع تنگناها به راحتی در مدت زمان، بسیار کوتاهی شبیه سازی و بهینه سازی نمود.

۴-۲ شبیه سازی

پیل سوختی، دستگاه تبدیل انرژی می باشد که در آن، انرژی شیمیایی یک سوخت گازی به طور مستقیم به انرژی الکتریکی بدون نیاز به مرحله واسطه تبدیل میشود که بسیار کارآمد است. در این فرآیند سوخت گازی متان و اتان و هوا می باشد. جداول ۴-۱ و ۴-۲ بترتیب مشخصات فرآیندی جریان های Air و Fuel(5) را نشان می دهند.

جدول ۴-۱ مشخصات فرآیندی Air(1)

	Overall
Vapour / Phase Fraction	1.0000
Temperature: (C)	25.00
Pressure: (bar)	1.000
Molar Flow (kgmole/h)	213.4
Mass Flow (kg/s)	1.710
Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h)	7.116
Molar Enthalpy (kcal/kgmole)	-1.930
Molar Entropy (kJ/kgmole-C)	151.8
Heat Flow (kcal/h)	-411.9
Liq Vol Flow @Std Cond (m3/h)	5042

جدول ۴-۲ مشخصات فرآیندی Fuel(5)

Vapour / Phase Fraction	1.0000
Temperature: (C)	25.00
Pressure: (bar)	1.000
Molar Flow (kgmole/h)	14.88
Mass Flow (kg/s)	7.000e-002
Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h)	0.8061
Molar Enthalpy (kcal/kgmole)	-1.893e+004
Molar Entropy (kJ/kgmole-C)	185.4
Heat Flow (kcal/h)	-2.817e+005
Liq Vol Flow @Std Cond (m3/h)	351.0

در این تحقیق جهت شبیه سازی این فرآیند، از مدل ترمودینامیکی Peng-Robinson و مجموعه نرم افزار Aspen Hysys نسخه V8.8 استفاده شد. شکل (۴-۱) شماتیک کلی شبیه سازی با نرم افزار Aspen Hysys را نشان می دهد. جداول ۴-۳ و ۴-۴ ترکیب درصد جریان Air و Fuel(5) را نشان می دهند. در این فرآیند هوا با دبی ۲۱۳,۳۷۷۵ کیلومول بر ساعت وارد کمپرسور و با افزایش از ۱ بار به ۸,۴۵ بار وارد مبدل حرارتی AR می شود.

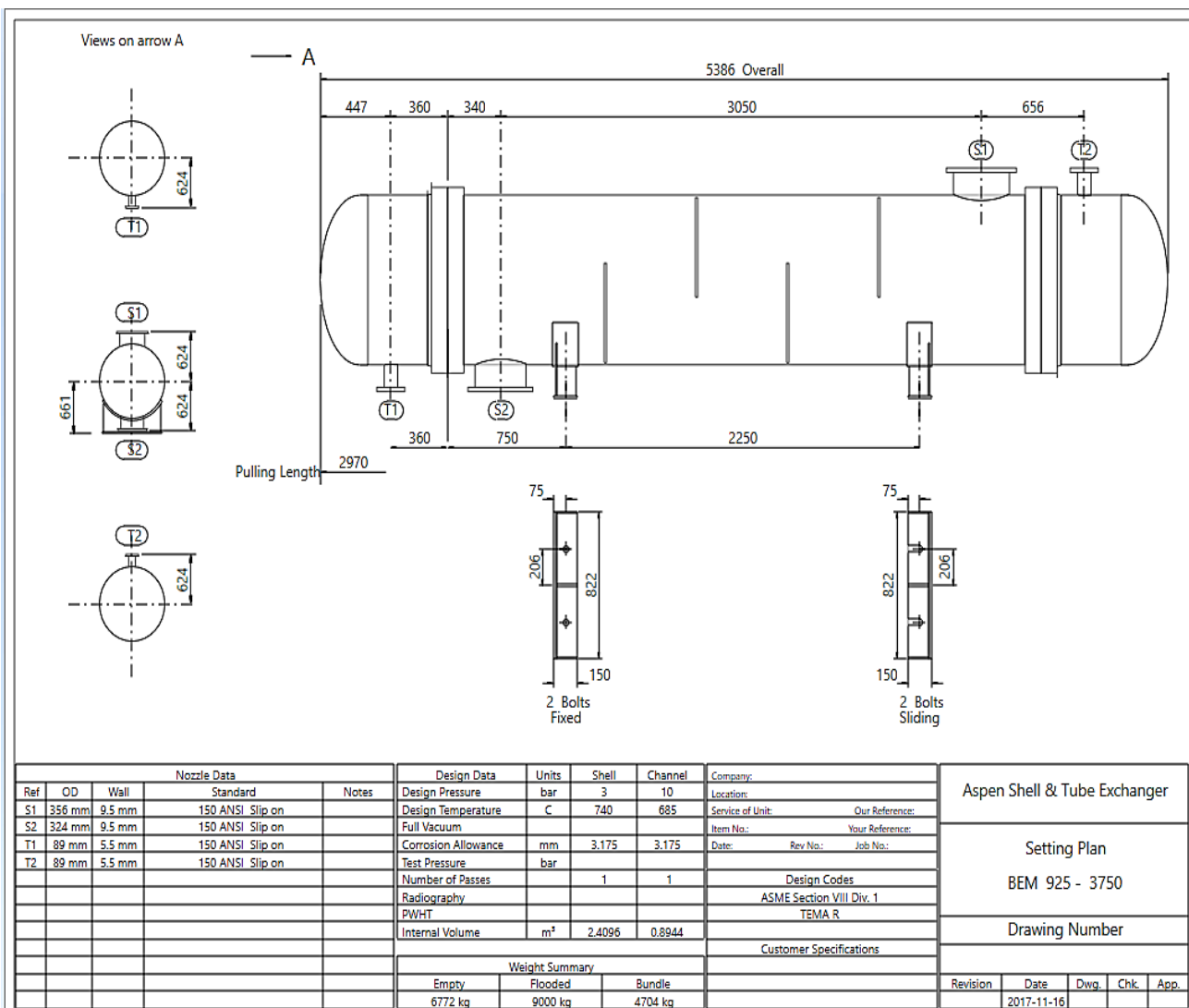
جدول ۴-۳ ترکیب درصد جریان Air(1)

COMPONENTS	MOLAR FLOW (kgmole/h)	MOLE FRACTION	MASS FLOW (kg/h)	MASS FRACTION
Methane	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ethane	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Nitrogen	168.5683	0.7900	4722.1029	0.7671
Oxygen	44.8093	0.2100	1433.8971	0.2329
H2O	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hydrogen	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CO2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CO	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Total	213.3775	1.0000	6156.0000	1.0000

جدول ۴-۴ ترکیب درصد جریان Fuel(5)

COMPONENTS	MOLAR FLOW (kgmole/h)	MOLE FRACTION	MASS FLOW (kg/h)	MASS FRACTION
Methane	14.1383	0.9500	226.8187	0.9001
Ethane	0.3721	0.0250	11.1878	0.0444
Nitrogen	0.1488	0.0100	4.1690	0.0165
Oxygen	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
H2O	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hydrogen	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CO2	0.2232	0.0150	9.8245	0.0390
CO	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Total	14.8824	1.0000	252.0000	1.0000

تولید برق توسط سیستم هیبریدی (Sofc-gt-ro) تامین می گردد، که این سیستم شامل دو توربین، دو کمپرسور، دو مبدل حرارتی و محفظه احتراق (راکتور گیس) می باشد (شکل ۴-۱). احتراق گاز پس از عبور از مبدل و افزایش دما از ۲۴۰،۴۰ درجه سانتیگراد به ۳۸۱،۱ درجه سانتیگراد توسط سه راکتور گیس بصورت سری انجام می شود.

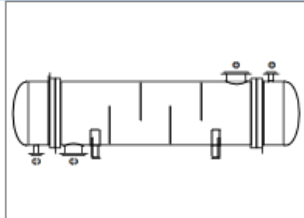


شکل ۴-۲ طراحی مبدل حرارتی Ar با Aspen Exchanger Design and Rating

تصویر فوق طراحی مبدل حرارتی برای مبدل هوا که با نرم افزار اسپن **ADER** را نشان می دهد که در آن ناحیه ۲ به ۳ شامل تیوب (لوله) با دبی بیشتر و به صورت مایع و ناحیه ۱۱ به ۱۲ پوسته به صورت بخار داغ که دما در قسمت مبدل افزایش یافته است. در واقع مایع وارد تیوب (لوله) و بخار داغ وارد پوسته می شود. در این قست (نازل) ۲ ناحیه برای تیوب و ۲ ناحیه برای پوسته وجود دارد. ضخامت دیواره ها ۹,۵ میلی متر می باشد که با استاندارد **ANSI Slip on** اندازه گیری شده است. در طراحی فشار برای مبدل فشار پوسته ۳ بار و فشار کانال ۱۰ بار بدست آمد که نشان از آن است فشار در قسمت کانال لوله ای بیشتر

می باشد . در طراحی دمای مبدل دمای پوسته ۷۴۰ درجه سانتیگراد و دمای کانال ۶۸۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری شد که استناد بر داغ تر بودن جریان در پوسته را اثبات می کند . همچنین حجم داخلی خوردگی برای پوسته ۲,۴۰۹۶ مترمکعب و برای کانال نیز ۰,۸۹۴۴ متر مکعب بدست آمد . در طراحی وزن مقدار آب گرفتگی مبدل ۹۰۰۰ کیلو گرم و قسمت خالی ۶۷۷۲ کیلو گرم محاسبه شد.

جدول ۴-۵ نتایج طراحی مبدل حرارتی Ar با Aspen Exchanger Design and Rating

Fluid allocation		Shell Side		Tube Side		
Fluid name						
Fluid quantity, Total		6408		6156		
Vapor (In/Out)		6408	6408	6156	6156	
Liquid		0	0	0	0	
Noncondensable		0	0	0	0	
Temperature (In/Out)		700.66	439.01	345.78	646.19	
Dew / Bubble point						
Density Vapor/Liquid		0.31 /	0.42 /	4.72 /	3.17 /	
Viscosity		0.0412 /	0.0321 /	0.0321 /	0.0448 /	
Molecular wt, Vap		28.05	28.05	28.85	28.85	
Molecular wt, NC						
Specific heat		1.252 /	1.191 /	1.081 /	1.134 /	
Thermal conductivity		0.067 /	0.0516 /	0.0464 /	0.0628 /	
Latent heat						
Pressure (abs)		90.806	89.062	845	842.247	
Velocity (Mean/Max)		11.4 / 15.91		0.74 / 0.93		
Pressure drop, allow./calc.		1.806	1.745	34	2.753	
Fouling resistance (min)		0		0	0 Ao based	
Heat exchanged		569.1	MTD (corrected)		72.01 °C	
Transfer rate, Service		11.1	Dirty 13.6	Clean 13.6	W/(m ² -K)	
CONSTRUCTION OF ONE SHELL						
		Shell Side		Tube Side		
Design/Vacuum/test pressure		kPa	300 /	1000 /		
Design temperature		°C	740	685		
Number passes per shell		1		1		
Corrosion allowance		mm	3.18	3.18		
Connections		In	mm	1 355.6 /		1 76.2 /
Size/Rating		Out	1 304.8 /	1 76.2 /		
ID		Intermediate	/	/		
Tube No. 1124 OD 19.05 Tks Average 2.11 mm Length 3750 mm Pitch 23.81 mm						
Tube type Plain		#/m	Material Carbon Steel	Tube pattern	30	
Shell Carbon Steel		ID 925 OD 949	mm	Shell cover	-	
Channel or bonnet Carbon Steel				Channel cover	-	
Tubesheet-stationary Carbon Steel		-		Tubesheet-floating	-	
Floating head cover -				Impingement protection	None	
Baffle-cross Carbon Steel		Type Single segmental	Cut(%d) 41.08	H Spacing: c/c	580 mm	
Baffle-long -		Seal Type	Inlet		900.48 mm	
Supports-tube U-bend		0	Type			
Bypass seal		Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')		
Expansion joint -		Type	None			
RhoV2-Inlet nozzle 141		Bundle entrance 50	Bundle exit 40	kg/(m-s ²)		

نتایج طراحی مبدل حرارتی برای خوراک هوا با استفاده از نرم افزار ADER نشان می دهد که در پوسته

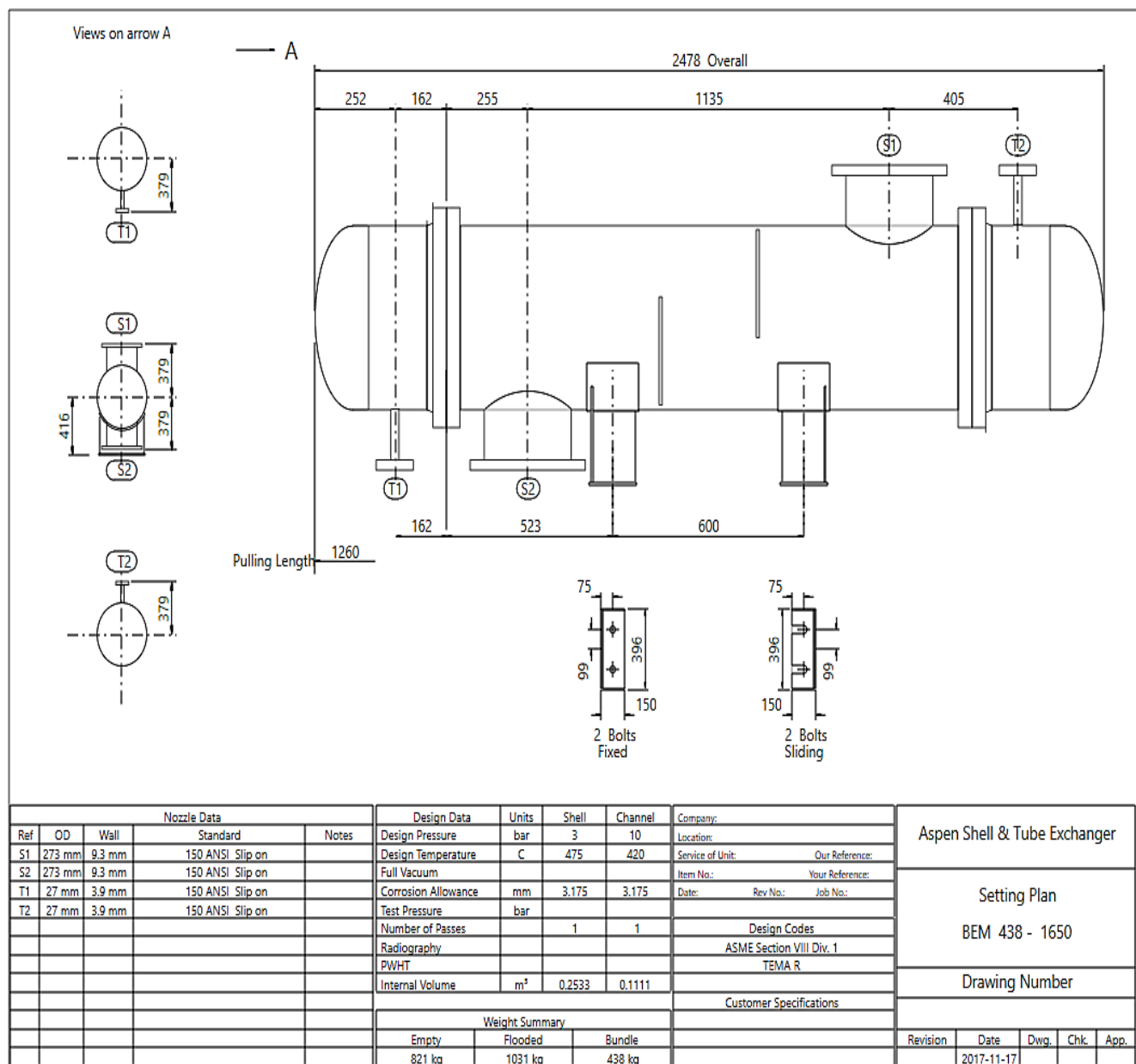
مبدل مقدار کلی سیال و مقدار ورودی و خروجی ۴۶۰۸ کیلو گرم بر ساعت و دمای ورودی ۷۰۰٫۶۶

درجه سانتیگراد و دمای خروجی ۴۳۹٫۰۱ درجه سانتیگراد می باشد . چگالی بخار در پوسته ۰٫۳۱ و ۰٫۴۲،

کیلو گرم بر مترمکعب بدست آمد . گرانیوی سیال در پوسته ۰٫۰۴۱۲ و ۰٫۳۲۱ سانتی پویز محاسبه شد .

گرمای ویژه در پوسته ۱٫۲۵۲ کیلو ژول و فشار پوسته ۹۰٫۸۰۶ و ۸۹٫۰۶۲ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد

همچنین برای لوله مقدار کلی سیال و مقدار بخار ورودی و خروجی ۶۱۵۶ کیلو گرم بر ساعت و دمای ورودی و خروجی تیوب ۳۴۵,۷۸ و ۶۴۶,۱۹ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. چگالی تیوب ۳,۱۷ و ۴,۷۲ کیلو گرم بر متر مکعب و گرانش آن ۰,۳۲۱ و ۰,۴۴۸ سانتی پويز حساب شد. وزن ملکولی بخار نیز ۲۸,۸۵ و گرمای ویژه ۱,۰۱۸ و ۱,۱۳۴ کیلو ژول و فشار تیوب ۸۴۵ و ۸۴۲,۲۴۷ کیلو پاسکال می باشد. گرمای مبادله شده در این مبدل ۵۶۹,۱ کیلو وات و دمای اصلاح شده ۷۲,۰۱ درجه سانتیگراد بدست آمد. برای ساخت یک پوسته مبدل با این شرایط در طراحی وکیوم و تست فشار برای پوسته ۳۰۰ و برای تیوب ۱۰۰۰ کیلو پاسکال حساب شد و در طراحی دما برای پوسته ۷۴۰ و برای تیوب ۶۸۵ درجه سانتیگراد محاسبه شد. نوع تیوب از نوع صاف و مسطح و نوع ماده استفاده شده فولاد کربن همچنین نوع کلاهک و در پوش و ورق لوله و سوپاپ فولاد کربن می باشد. ورودی نرم افزار ۵۰ کیلو گرم بر متر در مجذور ثانیه و خروجی نرم افزار ۴۰ کیلو گرم بر متر در مجذور ثانیه می باشد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد، وزن پوسته ۲۸۵,۹ کیلو گرم و هزینه ساخت تیوپ های مبدل به تعداد ۲۱۹ عدد، حدود ۳۱۰۲ دلار برای طراحی مبدل حرارتی FR موردنیاز می باشد.



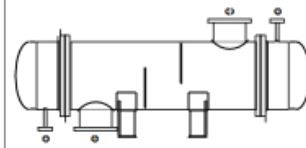
شکل ۴-۳ طراحی مبدل حرارتی FR با Aspen Exchanger Design and Rating

تصویر فوق طراحی مبدل حرارتی سوخت با نرم افزار اسپن ADER را نشان می دهد . ضخامت دیواره نازل ۹,۳ میلی متر در قسمت S1 و S2 همچنین در قسمت T1 و T2 ۳,۹ میلی متر می باشد . در مبدل حرارتی سوخت ناحیه ۶ به ۷ در تیوب به صورت مایع و ناحیه ۱۲ به ۱۳ در پوسته به صورت سیال بخار داغ می باشد . که دیواره نازل ها با استاندارد ANSI SLIP ON ۱۵۰ در نظر گرفته شده است . فشار مبدل در پوسته ۳ و در لوله ۱۰ بار می باشد . دمای طراحی مبدل در پوسته ۴۷۵ و در کانال لوله ۴۲۰

درجه سانتی گراد محاسبه شده است همچنین میزان خوردگی در پوسته و تیوب ۳,۱۷۵ میلی متر میباشد.
حجم داخلی پوسته ۰,۲۵۳۳ متر مکعب و در کانال لوله ۰,۱۱۱۱ متر مکعب محاسبه شده است . وزن فضای
خالی مبدل ۸۲۱ کیلو گرم و وزن آب گیری شده ۱۰۳۱ کیلو گرم حساب شده است .

جدول ۴-۶ نتایج طراحی مبدل حرارتی FR با Aspen Exchanger Design and Rating

Fluid allocation		Shell Side		Tube Side	
Fluid name					
Fluid quantity, Total		6408		252	
Vapor (In/Out)		kg/h	6408	kg/h	252
Liquid		kg/h	0	kg/h	0
Noncondensable		kg/h	0	kg/h	0
Temperature (In/Out)		°C	439.01	°C	240.37
Dew / Bubble point		°C	424.68	°C	381.12
Density Vapor/Liquid		kg/m ³	0.42 /	kg/m ³	3.36 /
Viscosity		cp	0.0321 /	cp	0.0176 /
Molecular wt, Vap			28.05		16.93
Molecular wt, NC			28.05		16.93
Specific heat		kJ/(kg-K)	1.191 /	kJ/(kg-K)	2.831 /
Thermal conductivity		W/(m-K)	0.0516 /	W/(m-K)	0.0679 /
Latent heat		kJ/kg			
Pressure (abs)		kPa	89	kPa	845
Velocity (Mean/Max)		m/s	38.88 / 52.74	m/s	0.21 / 0.24
Pressure drop, allow./calc.		kPa	4	kPa	34
Fouling resistance (min)		m ² -K/W	0	m ² -K/W	0
Heat exchanged		kW	30.3	MTD (corrected)	107.4
Transfer rate, Service		Dirty	4.6	Clean	24.4
					W/(m ² -K)
CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch
		Shell Side		Tube Side	
Design/Vacuum/test pressure		kPa	300 /	kPa	1000 /
Design temperature		°C	475	°C	420
Number passes per shell			1		1
Corrosion allowance		mm	3.18	mm	3.18
Connections		In	mm	1	mm
Size/Rating		Out	mm	1	mm
ID		Intermediate	mm	mm	mm
Tube No.		219	OD	19.05	Tks Average
					2.11
			mm	Length	1650
				mm	Pitch
					23.81
					mm
Tube type		Plain	#/m	Material	Carbon Steel
					Tube pattern
					30
Shell		Carbon Steel	ID	438.15	OD
				457.2	mm
Channel or bonnet		Carbon Steel	Shell cover		
			Channel cover		
Tubesheet-stationary		Carbon Steel	Tubesheet-floating		
			Impingement protection		
Floating head cover		-	None		
Baffle-cross		Carbon Steel	Type	Single segmental	Cut(%d)
					40.59
Baffle-long		-	Seal Type	H Spacing: c/c	
				305	
				mm	
Supports-tube		U-bend	0	Type	
Bypass seal		Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')	
Expansion joint		-	Type	None	
RhoV2-Inlet nozzle		323	Bundle entrance	278	Bundle exit
				442	kg/(m-s ²)



جدول فوق نتایج طراحی مبدل حرارتی سوخت با نرم افزار اسپن EDR را نشان می دهد که در آن مقدار

کلی و بخار ورودی و خروجی سیال بترتیب هر کدام ۶۴۰۸ کیلو گرم بر ساعت در پوسته و ۲۵۲ کیلو گرم

بر ساعت در تیوب می باشد . دمای ورودی و خروجی نیز بترتیب ۴۳۹،۰۱ و ۲۴۴،۶۸ درجه سانتیگراد در

پوسته و ۲۴۰،۳۷ و ۳۸۱،۱۲ سانتیگراد در تیوب می باشد. چگالی سیال در پوسته ۰،۴۲ و ۰،۴۱ کیلو گرم

بر مترمکعب و در تیوب ۳,۳۶ و ۲,۶۲ کیلو گرم بر مترمکعب می باشد . ویسکوزیته سیال بترتیب ۲۸,۰۵ و ۲۸,۰۵ سانتی پویز در پوسته و در تیوب ۱۶,۹۳ و ۱۶,۹۳ سانتی پویز می باشد . گرمای ویژه در پوسته ۱,۱۹۱ و ۱,۱۸۷ کیلو ژول بر کیلو گرم کلون و در تیوب ۲,۸۳۱ و ۳,۳۲۵ کیلو ژول بر کیلو گرم کلون محاسبه شده است . فشار در پوسته ۸۹ و ۸۵,۲۵۷ کیلو پاسکال و در تیوب ۸۴۵ و ۸۴۳,۲۱۴ کیلو پاسکال میباشد . گرمای مبادله شده در مبدل ۳۰,۳ کیلو وات می باشد . (جدول ۴-۳) برای ساخت یک پوسته میزان فشار ۳۰۰۰ کیلو پاسکال در پوسته و ۱۰۰۰ کیلو پاسکال در تیوب برای تست فشار لازم است و دمای طراحی ۴۷۵ و ۴۲۰ درجه سانتیگراد می باشد . نوع تیوب مسطح بوده و از نوع فولاد کربن می باشد همچنین نوع پوسته و جنس کانال و ورق لوله و سوپاپ از نوع فولاد کربن می باشد . احتراق کاملی از جریان Fuel (۵) با اکسیژن موجود در جریان Air (۱) در سه راکتور گیس انجام می شود. نتایج شبیه سازی نشان در جداول ۴-۷ و ۴-۸ نشان می دهد، ۱۴,۱۳۸۳ کیلومول بر ساعت متان و ۰,۳۷۲۱ کیلومول بر ساعت اتان در جریان (۵) سوخت در سه راکتور با ۴۴,۸۰۹۳ کیلو مول بر ساعت اکسیژن موجود در جریان Air(1) ، احتراق کامل انجام و تبدیل به نیتروژن، اکسیژن، بخار آب و کربن دی اکسید در خروجی راکتور سوم تبدیل میشود.

جدول ۴-۷ مشخصات فرآیندی جریان خروجی از راکتور AF.

Vapour / Phase Fraction	1.0000
Temperature: (C)	1129
Pressure: (bar)	8.110
Molar Flow (kgmole/h)	228.4
Mass Flow (kg/s)	1.780
Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h)	7.626
Molar Enthalpy (kcal/kgmole)	-4646
Molar Entropy (kJ/kgmole-C)	194.0
Heat Flow (kcal/h)	-1.061e+006
Liq Vol Flow @Std Cond (m3/h)	5387 *

جدول ۴-۸ ترکیب درصد ترکیبات درجریان خروجی از راکتور AF حاصل از شبیه سازی

COMPONENTS	MOLAR FLOW (kgmole/h)	MOLE FRACTION	MASS FLOW (kg/h)	MASS FRACTION
Methane	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ethane	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Nitrogen	168.7171	0.7385	4726.2719	0.7376
Oxygen	15.2306	0.0667	487.3785	0.0761
H2O	29.3927	0.1287	529.5121	0.0826
Hydrogen	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CO2	15.1056	0.0661	664.7926	0.1037
CO	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000
Total	228.4460	1.0000	6407.9557	1.0000

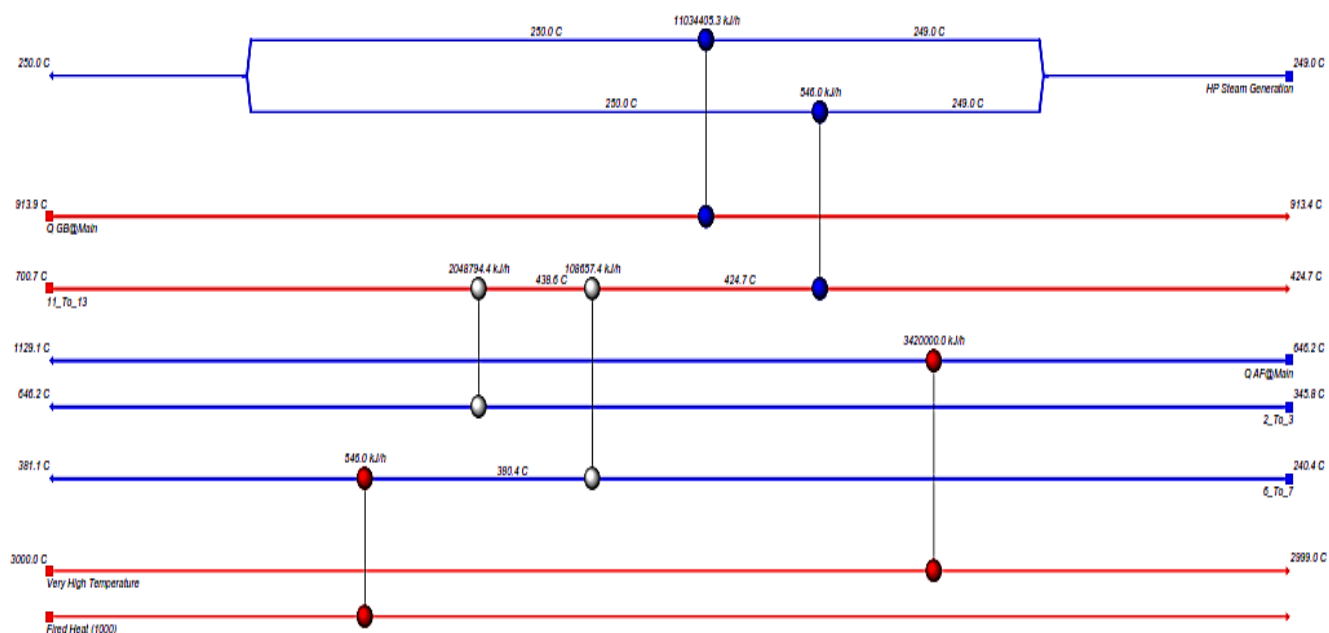
جریان خروجی از بالای راکتور AF (جریان ۹) وارد Expander اول (GT) شده و فشار آن از ۸,۱۱۰ بار

به ۲,۶۸۱ بار کاهش و در اکسپندر دوم (PT) به فشار ۰,۹۰۸۱ کاهش می یابد که انرژی مورد نیاز پمپ

(P-100) را تامین میکند. همچنین تحلیل انرژی واحد با Aspen Energy Analyzer انجام شد.

شکل (۴-۴) شماتیک شبیه سازی واحد با Aspen Energy Analyzer را نشان می دهد.

۴-۳ آنالیز انرژی



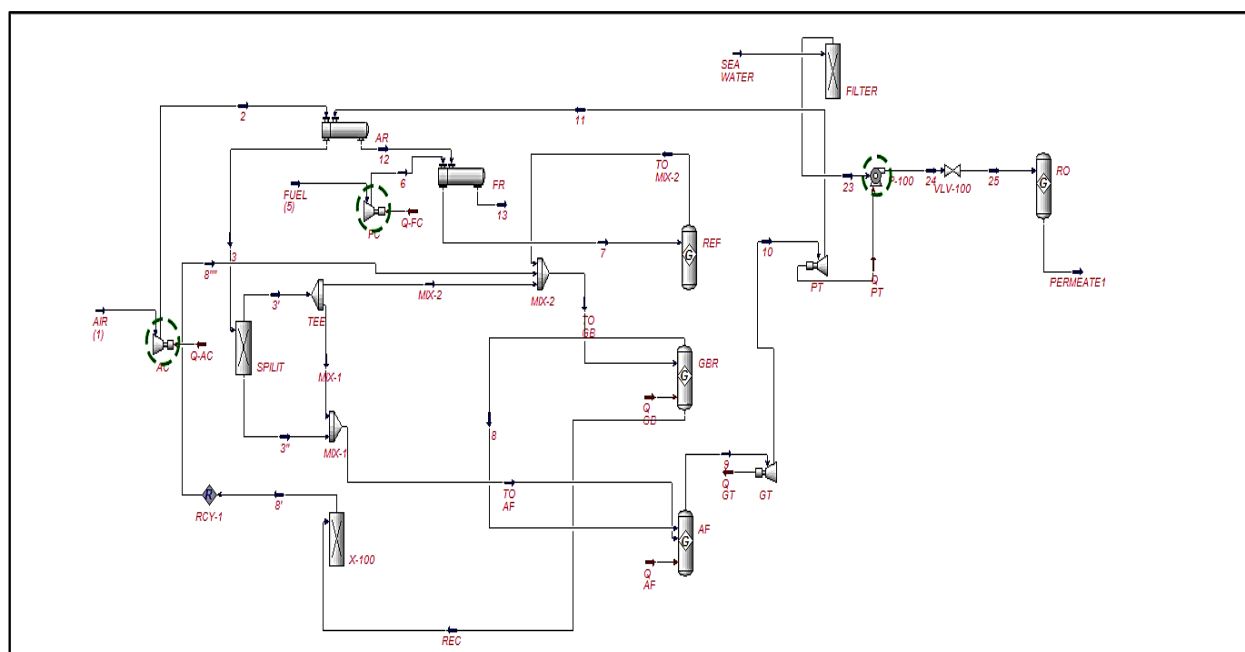
شکل ۴-۴ شبیه سازی واحد با Aspen Energy Analyzer

نتایج شبیه سازی با Aspen Energy Analyzer نشان می دهد، کل انرژی واحد حدود 1.445×10^7 کیلو ژول بر ساعت است، سهم انرژی منابع گرم فرآیندی در حدود 3.421×10^6 کیلو ژول بر ساعت و انتشار کربن حدود $807,9$ کیلوگرم بر ساعت می باشد (جدول ۴-۹). در این شبیه سازی ۸ جریان وجود دارد که جریان بالای پینچ شامل جریان فشار بالا بوده که خود به دو جریان منشعب می شود. این جریان از ۲۴۹ به ۲۵۰ سانتیگراد پیش می رود. بقیه جریان ها بدون هیچ انشعابی طراحی شد. جریان دوم مربوط به قسمت آند بوده که دما از $913,9$ به $913,4$ کاهش می یابد. جریان سوم مربوط به ناحیه ۱۱ تا ۱۳ می باشد که از $700,7$ به $646,2$ درجه سانتی گراد کاهش می یابد. همچنین جریان پنجم مربوط به ناحیه ۲ به ۳ بوده که از $345,8$ به $240,4$ افزایش می یابد و جریان ششم مربوط به ناحیه ۶ تا ۷ بوده که دمای آن از $240,4$ به $2999,0$ درجه سانتی گراد کاهش می یابد. جریان ۷ دارای دمای بالایی می باشد. جریانهای ۱ تا ۴ بالای پینچ و جریانهای ۵ تا ۸ پایین پینچ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۹ آنالیز انرژی واحد

Heat Exchanger	Type	Status	Base Duty [kJ/h]	Recoverable Duty [kJ/h]	Hot Inlet Temperature [C]	Hot Outlet Temperature [C]	Cold Inlet Temperature [C]	Cold Outlet Temperature [C]	Hot Side Fluid	Cold Side Fluid
Q AF@Main Exchanger	Heater	✓	3.42E+06	1.825E+06	3000.0	2999.0	646.2	1129.1	Very High Temperature	Q AF@Main
AR@Main	Process Exchanger	✓	2.049E+06	0.0	700.7	438.6	345.8	646.2	11_To_13	2_To_3
FR@Main	Process Exchanger	✓	1.087E+05	0.0	438.6	424.7	240.4	380.4	11_To_13	6_To_7
Q GB@Main Exchanger	Cooler	✓	1.103E+07	0.0	913.9	913.4	249.0	250.0	Q GB@Main	HP Steam Generation

آنالیز انرژی واحد میزان دمای داغ و سرد ورودی و همچنین دمای سرد و داغ خروجی را نشان می دهد که چه مقدار دما از هر قسمت انتقال یافته است.



شکل ۴-۵ شماتیک شبیه سازی واحد با Aspen Economics Analyzer

شماتیک کلی سیستم توسط نرم افزار و تجهیزات همچنین جریان های ورودی و خروجی هر تجهیز در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. این مدلسازی با کم ترین تجهیزات ممکن و با صرفه ترین امکانات انجام شده است.

۴-۴ نتایج بررسی اقتصادی

جدول ۴-۱۰ تحلیل اقتصادی واحد

Name	Equipment Cost [USD]	Installed Cost [USD]	Equipment Weight [LBS]	Installed Weight [LBS]	Utility Cost [USD/HR]
FR	8,700	108,400	600	10860	0
RO	193,000	349,900	39200	57959	0
FC	956,700	1,073,900	13500	24702	2.89075
AR	470,100	802,800	78900	126337	0
P-100	373,200	501,400	19400	43855	40.4705
AC	1,215,300	1,374,400	22100	39411	46.252

نتایج بررسی با Economics Analyzer در جدول (۴-۱۰) نشان می دهد، بیشترین هزینه ها مربوط به کمپرسورهای FC و AC، و پمپ P-100 در واحد می باشد (شکل ۴-۵). هزینه مربوط به AC در حدود ۱۲۱۵۳۰۰ دلار آمریکا بر ساعت و P-100 در حدود ۳۷۳۲۰۰ دلار آمریکا بر ساعت است. همچنین هزینه های مربوط به برخی از تجهیزات و Utility ها در جدول (۴-۱۰) ارائه شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد، انرژی الکتریکی مصرفی واحد حدود ۱۲۳۰،۷۶ کیلو وات می باشد که هزینه ۹۵،۳۸۴۱ دلار در ساعت را شامل می شود. در این واحد، برای پمپاژ ۴۱۴۵ کیلو مول بر ساعت از آب دریا از انرژی اکسپندر PT که حدود ۴۴۳ کیلو وات می باشد، استفاده شد. تحلیل اکسرژی از یک سری مفاهیم و روابط اساسی به دست آمده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای تجزیه و تحلیل سیستم ها استفاده می کند. از دیدگاه تحلیل اکسرژی، محیط جسم بزرگی است که در تعادل ترمودینامیکی قرار دارد و هیچ گرادیانی اعم از فشار، دما و پتانسیل شیمیایی وجود ندارد. لذا در این تحقیق، واحد به عنوان سیستم و خارج از آن به عنوان محیط در نظر گرفته میشود. در این بخش ابتدا محاسبات اکسرژی واحد مورد بررسی قرار می گیرد و سپس با بررسی راندمان اکسرژی تجهیزات

شناسایی دستگاهی که عملکرد نامناسب در فرایند را دارد انجام می شود. برای تحلیل اکسرژی فیزیکی

گاز و مایع از معادلات زیر استفاده می گردد.

$$ex_{ph} = C_p(T - T_o) - C_p T_o \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) + v(P - P_o) \quad (1-4)$$

$$ex_{ph} = C_p(T - T_o) - C_p T_o \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) + RT_o \ln\left(\frac{P}{P_o}\right) \quad (2-4)$$

$$E \quad (3-4)$$

در روابط فوق، C_p ظرفیت گرمایی بر حسب (Kj/Kg.K) و v حجم مولی بر حسب (m³/mol) R ، ثابت

گاز، S_{ph} به ترتیب آنتالپی و آنتروپی جریان موردنظر برای محاسبه اتلاف و راندمان اکسرژی از روابط ۴ و

۵ استفاده میگردد.

$$EX_{loss} = \sum EX_{in} - \sum EX_{out} \quad (4-4)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sum EX_{out}}{\sum EX_{in}} \quad (5-4)$$

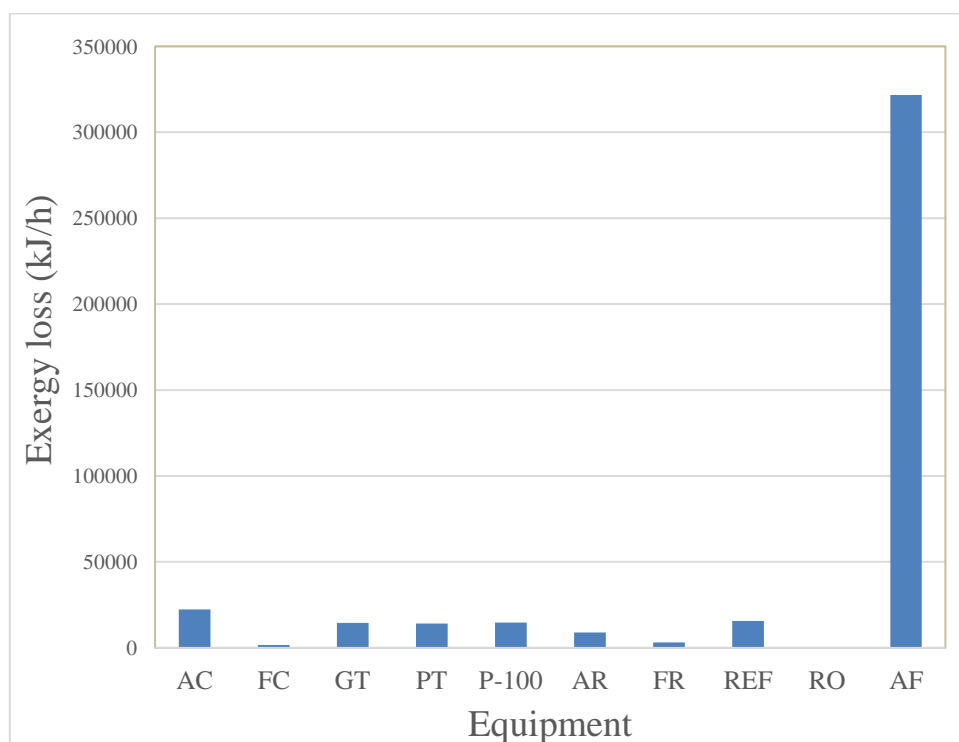
جهت محاسبه اکسرژی جریان‌ها، اطلاعاتی از جمله، دبی مولی، آنتالپی، آنتروپی جریان‌ها موردنیاز می‌باشد که این اطلاعات، از فایل شبیه‌سازی واحد با نرم‌افزار Aspen Hysys (ورژن ۸٫۸) که انجام و تحلیل گردید استخراج می‌شود، که در جدول (۴-۱۱) ارائه شده است.

جدول ۴-۱۱ داده های مورد نیاز برای محاسبه ی اکسرژی با نرم افزار Aspen HYSYS (ورژن ۸٫۸)

stream	Temperature [C]	Pressure [kPa]	Molar Flow [kgmole/h]	Mass Flow [kg/h]	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	Molar Entropy [kJ/kgmole- C]
AIR (1)	25	100	213.3775496	6156	7.116340369	- 8.0761919598253	151.8013008
FUEL (5)	25	100	14.88238	252	0.806121	-79199.1	185.4385
SEA WATER	25	100	4144.523	74664	74.81468	-286221	53.70384
2	345.7813105	845	213.3775496	6156	7.116340369	9663.162656	155.9764186
3	646.2	811	213.3775	6156	7.11634	19264.9	168.9448
6	240.3742	845	14.88238	252	0.806121	-70268.6	190.0006
7	381.1	811	14.88238	252	0.806121	-62930.9	202.9297
8	913.9	811	46.43491	1255.684	1.39152	-244365	216.7233
9	1129.081	811	228.446	6407.956	7.625602	-19436.8	194.0048
10	896.3131	268.1	228.446	6407.956	7.625602	-28009.6	196.535
11	700.6571	90.8063	228.446	6407.956	7.625602	-34990.6	199.0102
12	439.0127	89	228.446	6407.956	7.625602	-43959	188.4657
13	424.6776	85	228.446	6407.956	7.625602	-44437.1	188.17
23	23.51977	6821	4144.523	74664	74.81468	-286221	53.22482
24	24.90065	23008	4144.523	74664	74.81468	-285836	53.36662
25	28.48827	6783.996	4144.523	74664	74.81468	-285836	54.51376
TO MIX-2	361.22	811	15.15405	252.0001	0.807294	-61802.7	199.884
PERMEATE1	28.48827	6783.996	4144.523	74664	74.81468	-285836	54.51376
TO AF	646.2005	811	182.011	5152.272	6.234082	19157.05	167.1151

نمودار های زیر به ترتیب اتلاف و بازده اکسرژی تجهیزات را نشان می دهد. با توجه به نمودار ها مشخص است که راکتور AF و راکتور RO به ترتیب بیشترین (۳۲۱۶۶۶,۷ کیلوژول بر ساعت) و کمترین (۰,۱۵۳۸۳۹ کیلوژول بر ساعت) مقدار اتلاف اکسرژی را دارند، که با توجه به نمودار، بیشترین بازده اکسرژی، برای راکتور RO با مقدار نزدیک به ۱ و کمترین بازده برای راکتور REF با مقدار ۰,۹۳۴۰۲۹ را نشان می دهد .

۴-۵ نتایج آنالیز تخریب اکسرژی



نمودار ۴-۱ اتلاف اکسرژی تجهیزات مورد استفاده در فرایند

نتایج تحلیل اکسرژی که مبتنی بر روابط اکسرژی می باشد نشان مس دهد که بیشترین اتلاف متعلق به محفظه احتراق (برنر) می باشد که آنالیز های اقتصادی و محیط زیستی بر روی آن انجام می شود . کمترین اتلاف نیز مربوط به اسمز معکوس و کمپرسور سوخت می باشد .

۴-۶ نتایج آنالیز بازده اکسرژی



نمودار ۴-۲ بازده اکسرژی تجهیزات مورد استفاده در فرآیند

نتایج بازده اکسرژی حاکی از آن است که اسمز معکوس با توجه به اتلاف کم بیش ترین بازده را دارد و ریفمر (بهساز) کمترین بازده اکسرژی را داراست .

۴-۷ نتایج اگزرژی و اقتصادی

جدول ۴-۱۲ برخی هزینه های عملیاتی و تجهیزات و هزینه های سرمایه فرایند را نشان می دهد .

هزینه کلی تجهیزات (USD/YEAR)	۸۳۶,۱۳۵
هزینه کلی نصب USD	۴,۲۱۰,۸
هزینه کلی عملیاتی (USD/YEAR)	۳,۰۰۸,۹
هزینه کلی سرمایه USD	۹,۷۰۹,۱۱

جدول ۴-۱۳ تغییرات قیمت و قیمت هر جریان انرژی در SOFC-GT-RO

جریان ها	$C^0 (\$/h)$	$C (\$/GJ)$
۱	۰	۰
۲	۱۲۰۶	۲۲.۵۲ و ۵۲۰
۳	۱۹۷۴	۱۹,۱۸
آب دریا	۰	۰
۵	۰	۰
۶	۶۰۳۷	۱۵,۷۹
۷	۳۴۰۷	۱۵,۷۹
۸	۱۳۹۵	۱۵,۷۹
۹	۲۲۶,۶	۱۵,۷۹
۱۰	۱۲۰۶	۲۲,۵۲
۱۱	۳۰۲۱	۹,۵۱
۱۲	۱۳۹,۲	۱۵,۷۹

۱۳	۰,۱۶۶	۳۲,۷۱
۲۳	۲,۵۱۸	۵۸,۲۸
۲۴	۵,۳۹۶	۶۳,۷۱
۲۵	۹۳,۳۶	۳۲,۰۱
به میکس-۲	۹,۱۸۳	۳۲,۲۸
پریمیت-۱	۷,۸۵۳	۹۰,۸
به محفظه احتراق	۷,۲۷۵	۳۲,۰۷

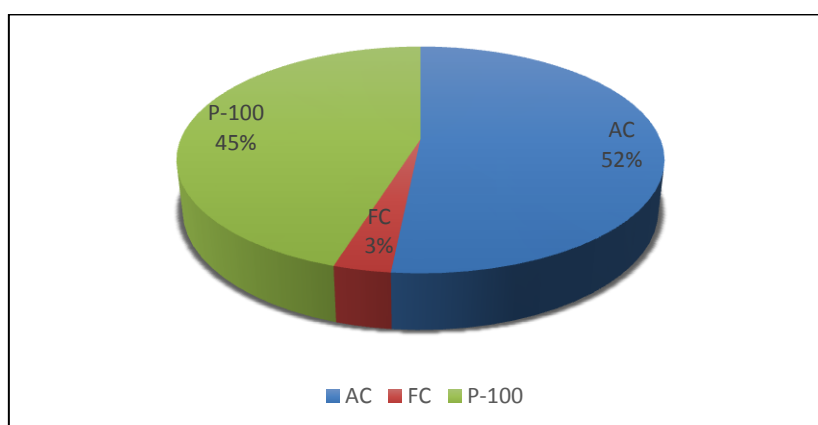
فاکتور اگزرتو اکونومیک برای این چرخه نشان می دهد که ۱۲,۶۶٪ از هزینه های سیستم مربوط به هزینه های سرمایه گذاری است و بقیه مربوط به هزینه تخریب اگزرتی می باشد . که در آن C قیمت مخصوص هر جریان و C^0 قیمت اگزرتی هر کدام را نشان می دهد .

جدول ۴-۱۴ نتایج اگزروزو اکونومیک سیستم ترکیبی sofc-gt-ro

ترکیبات	$C_f(\$/GJ)$	$C_p(\$/GJ)$	$C_d(\$/h)$	$Z(\$/h)$	r	f
کمپرسور هوا	۱۶,۹۸	۱۹,۱۸	۱۳۴,۵	۹۱,۱۳	۱۲,۸۹	۴۰,۳۲
محفظه احتراق	۱۱,۷۶	۱۵,۸	۱۱۷۳	۸,۲۳۹	۲۴,۳۲	۰,۶۹۷
توربین گازی	۱۵,۴	۱۶,۹۹	۱۷۲,۳	۸۹,۰۳	۷,۵۶	۳۴,۰۵
پمپ-۱۰۰	۴۳,۲۱	۶۱,۴۴	۰,۲۸۴	۰,۴۱۲	۴۲,۱۷	۵۹,۱۷
توربین توان	۳۲,۰۲	۴۵,۳۲	۴,۲۶	۹,۹۸۱	۳۵	۳۸,۶۲
کمپرسور سوخت	۱۴,۹	۱۹,۱۸	۱۶۱,۲	۲۱,۷۵	۲۱,۴۹	۱۲,۰۲
مبدل (اکسچنجر)	۱۴,۹	۲۲,۶۶	۳۲۸	۳۶,۹۸	۴۳,۱۷	۱۰,۶۶
اسمز معکوس	۳۲,۰۳	۶۷,۴۵	۰,۵۴۳۸	۰,۹۷۰	۱۱۱	۶۴,۱
کل سیستم	—	—	—	۲۶۰,۱	—	۱۰,۸۳

نتایج آگزرژو اکونومیک سیستم متوسط قیمت اکسرژی در واحد سوخت و در واحد محصولات و قیمت اتلاف اکسرژی همچنین قیمت سرمایه گذاری و نسبت تفاوت قیمت و فاکتور آگزرژو اکونومیک هر تجهیز را نشان می دهد .

قیمت نهایی این سیستم به دلیل استفاده از پمپ اسمز معکوس از ۳,۵ به ۲,۱۵ دلار در هر متر مکعب کاهش یافت . همچنین نتایج در شکل زیر نشان می دهد، هزینه عملیاتی مربوط به AC حدود ۴۶/۲۵، کمپرسور FC حدود ۲/۸۹ و پمپ P-100 حدود ۴۰/۴۷ دلار در ساعت می باشد.



نمودار ۴-۳ مقایسه‌ی هزینه‌های عملیاتی

نتایج بررسی با Economics Ananlyzer نشان می دهد، بیشترین هزینه‌ها مربوط به کمپرسورهای FC و AC، و پمپ P-100 در واحد می باشد. هزینه مربوط به AC در حدود ۱۲۱۵۳۰۰ دلار آمریکا بر ساعت و P-100 در حدود ۳۷۳۲۰۰ دلار آمریکا بر ساعت است. همچنین هزینه‌های مربوط به برخی از تجهیزات و Utility ها در جدول (۴-۱۰) ارائه شده است.

۴-۸ نتایج آنالیز اگزورژو محیط زیستی

آلاینده های اصلی در محفظه احتراق بوجود می آیند و دلیل آن وجود عوامل سوختن در این قسمت از فرآیند می باشند و شامل مونوکسید کربن و دی اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن می باشند که برخی به صورت احتراق ناقص سوزانده می شود و موجب آلاینده گی می شوند .

۴-۹ هزینه های زیست محیطی

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که هزینه محصولات و تاثیرات محیط زیستی به ترتیب ۱۲٫۸ و ۴۹٫۳ درصد کاهش یافته و راندمان اگزورژی کل افزایش یافته است . همچنین هزینه اگزورژی ۱۸٫۳ کاهش می یابد. آلاینده های اصلی در توربین گازی و محفظه احتراق شامل اکسیدهای نیتروژن و مونوکسید کربن و دی اکسید کربن می باشد .

جدول ۴-۱۵ میزان انتشار گازهای آلاینده بر حسب دلار بر کیلو گرم

کربن دی اکسید	اکسیدهای نیتروژن	کربن مونو کسید	انتشارات گازها
۰٫۰۲۴	۸٫۱۷۵	۶٫۲۴۲	قیمت (دلار بر کیلو گرم)

جدول ۴-۱۶ جزئیات یوتیلیتی دما بالا و دما پایین

صرفه جویی در مصرف کننده	هدف	در حال حاضر	
[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	
0.02834	0.02476	0.0531	دمای بسیار بالا
8.477E-06	0	8.477E-06	حرارت داغ (۱۰۰۰)
0.02834	0.02476	0.0531	یوتیلیتی کل گرما
0.02834	0.143	0.1713	بخار فشار بالا
0.02834	0.143	0.1713	یوتیلیتی کل دما پایین

۴-۱۰ اعتبار سنجی

مقایسه پروژه مورد نظر با سایر نتایج

عنوان پروژه : بهینه سازی پیل سوختی کربنات مذاب توربین گازی چند منظوره و ارزیابی اگزرتیک و اقتصادی و محیط زیستی آن.

علیرضا حقیقت ممغانی - بهزاد نجفی - علی شیرازی - فابیو رینالدی

سال: ۲۰۱۴

بازده اینورتر جریان AC-DC (درصد)	توان خروجی توربین گازی (کیلووات)	توان خروجی کمپرسور هوا (کیلووات)	نرخ هزینه کل (دلار)	بازده اگزرژی کل سیستم (درصد)	
۹۵	۵۴۴	۵۷۳	۲۵۶۱۹۷	۷۶,۹۸	Sofc-gt
۹۰	۸۶,۴	۴۸,۴	۳۲۴۰۶۰	۵۱,۷	Mcfc-gt

عنوان پروژه: پیل سوختی اکسید جامد و سیکل ترانسکریپتیکال کربن دی اکسید

کینگشان منگ - های لیو - تاو ژانگ

سال: ۲۰۱۶

توان کمپرسور هوا (کیلو وات)	توان کمپرسور سوخت (کیلو وات)	بازده اینورتر جریان AC-DC (درصد)	بازده کل سیستم (درصد)	
۵۷۳,۲۳	۳۶,۹۱	۹۰	۷۳,۸	Sofc-gt
۵۴۲,۵۰	۳۳,۶۲	۹۵	۴۹,۲۱	Sofc-gt

عنوان پروژه: آنالیز انرژی و اگزرژی و اقتصادی سیستم توان پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز با سیکل

آلی رانکین

والری اولوی - ویرینیا کاراکیون - پتر پودگرز - علی العلی

سال: ۲۰۱۶

	بازده اگزرژی کل سیستم (درصد)
Sofc-gt	۷۶٫۹۸
Sofc-gt	۶۲

عنوان پروژه: مدل سازی حالت پایا یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی

پنیارت چیندا - پاسکال براوت

	بازده سیستم (درصد)	توان پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی (کیلو وات)	
Sofc-gt	۷۳٫۸	۲۰۵۶	۵۴۴
Sofc-gt	۵۸	۴۶۳	۱۳۹

عنوان پروژه: اثر سوخت بیومس گازی شکل بر ذخیره مشخصات دما متوسط یک پیل سوختی اکسید جامد

توربین گازی

ژیازینگ گو - ژینگ لیو - یو ونگ

	بازده سیستم (درصد)
Sofc-gt	۷۳٫۸
Sofc-gt	۵۷

عنوان: بهینه سازی تکنو اقتصادی و محیط زیستی پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی با مقیاس

کوچک غشاء آب شیرین کن

والری اولوی - پتر رودگرز

سال: ۲۰۱۷

بازده اگزرژی سیستم (درصد)	توان توربین قدرت (کیلو وات)	توان توربین گازی (کیلو وات)	بازده سیستم (درصد)	
۷۶,۹۸	۴۴۳	۵۴۴	۷۰,۵	Sofc-gt
۷۰,۳	۳۲۱	۳۳۶	۷۳,۸	Sofc-gt

عنوان : مدلسازی ترمودینامیکی یک سیکل توربین گاز ترکیب شده با پیل سوختی اکسید جامد

حاصلی - دینسر - ناترر

سال: ۲۰۰۸

بازده اینورتر جریان AC-DC (درصد)	بازده سیستم (درصد)	
۸۹	۷۰,۵	Sofc-gt
۹۵	۶۰	Sofc-gt

عنوان : بهینه سازی یک پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی بر پایه مدل سازی ترموآکونومیکی

پیرقندی - مصطفی محمودی - محمود امیان

سال: ۲۰۱۷

بازده الکتریکی (درصد)	بازده اینورتر جریان AC-DC (درصد)	توان پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز (کیلو وات)	توان توربین گازی (کیلو وات)	توان کمپرسور سوخت (کیلو وات)	توان کمپرسور هوا (کیلو وات)	
۷۳,۸	۹۵	۲۰۵۶	۵۴۴	۳۶,۹	۵۷۳,۲۳	Sofc-gt (کار پروژه خودم)
۶۲,۲	۸۹	۱۷۴۱	۳۷۷,۲	۲۶,۵	۳۰۲	Sofc-gt (کار پروژه عنوان شده)

Sofc-gt شیرازی ۲۰۱۰	۳۰۳,۸	۲۷,۱	۳۷۶,۸	۱۷۳۸,۰۴	—	۶۱,۳
---------------------------	-------	------	-------	---------	---	------

عنوان : تحلیل اگزورژی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکرو توربین گاز

احمد طهماسبی – احمد صداقت – علی اکبر عالم رجبی

سال: ۱۳۷۸

	بازده کلی سیستم (درصد)
Sofc-gt	۷۳,۸
Sofc-gt	۶۵

عنوان : شبیه سازی و آنالیز ترمودینامیکی سیکل ترکیبی توربین گازی مجهز به پیل سوختی اکسید جامد

لوله ای و بررسی میزان برگشت ناپذیری سیستم ترکیبی.

هامون پور میرزا آقا – رضا ابراهیمی

سال: ۱۳۹۱

	بازده سیستم (درصد)
Sofc-gt	۷۳,۸
Sofc-gt	۵۶,۹
تسه و همکارانش Sofc-gt	۵۹,۴

عنوان : آنالیز اگزورژی و اقتصادی همچنین بهینه سازی یک پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی

معین شמושکی – م.احیایی-فرخ قناطر

سال : ۲۰۱۷

	بازده کل اگزرژی سیستم (درصد)
Sofc-gt	۷۶,۹۸
Sofc-gt	۵۷,۷

مقایسه

	بازده الکتریکی سیستم (درصد)	بازده اگزرژی سیستم (درصد)
Sofc-gt	۷۶,۹۸	۷۳,۸
پالسون (۶۰) پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز	۶۵	–
ال امام و دینسر (۶۱) پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز	–	۳۷,۷
ونگ پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز (۶۲)	۷۰	۶۷

عنوان :ارزیابی اگزرژتیک و اقتصادی و محیط زیستی و بهینه سازی چند منظوره اصلاح داخلی پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز کوپل شده با سیکل رانکین

علی شیرازی – بهزاد نجفی – فایو رینالدی

سال : ۲۰۱۶

	بازده اگزرژی سیستم (درصد)
Sofc-gt	۷۶,۹۸
Sofc-gt	۶۵,۱۱

عنوان : بهینه سازی یک سیستم چند منظوره پیل سوختی اکسید جامد توربین گازی

سال : ۲۰۱۴

سانای و همکارانش

بازده اگزرژی کل سیستم (درصد)	
۷۶,۹۸	Sofc-gt
۶۰,۷	Sofc-gt(۶۳)

عنوان : تحلیل ترمودینامیکی و آنالیز اگزرژی سیکل های نوین تولید همزمان برق و حرارت و پیل سوختی اکسید جامد

محمود ابراهیمی – مجتبی حیدری

سال : ۱۳۸۹

توان خروجی سیکل (کیلو وات)	راندمان اگزرژی سیستم (درصد)	
۲۰۵۶	۷۶,۹۸	Sofc-gt-ro
۲۰۹۰,۹۲	۶۱	Sofc-gt-sg

عنوان : بهینه سازی الگوریتم ژنتیک اگزرجو اقتصادی سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد توربین گاز و MED

روح ا... احمدی – سید محمد پور فاطمی – سعید غفاری

سال ۲۰۱۷

با توجه به سیستم پروژه حاضر که بازده اگزرژی کل سیستم (sofc-gt-ro) ۷۶,۹۸ درصد می باشد در صورتیکه بازده کلی اگزرژی سیستم عنوان فوق ۶۳,۵ برای سیستم sofc-med می باشد .

جدول ۴-۱۷ مقایسه پیل های سوختی آلی

قلیایی	متانول	کربنات مذاب	اسید فسفریک	پلیمری	اکسید جامد	
هیدروکسید پتاسیم	غشاء پلیمری	مایع کربنات مذاب ثابت	مایع اسید فسفریک ثابت	غشاء پلیمری	سرامیک	الکترولیت
۶۰-۹۰	۶۰-۱۳۰	۶۵۰	۲۰۰	۸۰	۱۰۰۰	دمای عملیاتی
۴۰ تا ۶۰٪	۴۰٪	۴۵ تا ۶۰٪	۳۵ تا ۴۰٪	۴۰ تا ۶۰٪	۵۰ تا ۶۵٪	بازده
تا ۲۰ کیلو وات	کمتر از ۱۰ کیلو وات	بیش از یک مگاوات	بیش از ۵۰ کیلو وات	تا ۲۵۰ کیلو وات	بیش از ۲۰۰ کیلو وات	توان تولیدی
زیر دریایی و فضایی	کاربردهای قابل حمل	نیروگاهی	نیروگاهی	وسایل نقلیه نیروگاه کوچک	نیروگاهی	کاربرد

جدول ۴-۱۸ مقایسه بین انواع لوله ای و صفحه ای پیل سوختی اکسید جامد

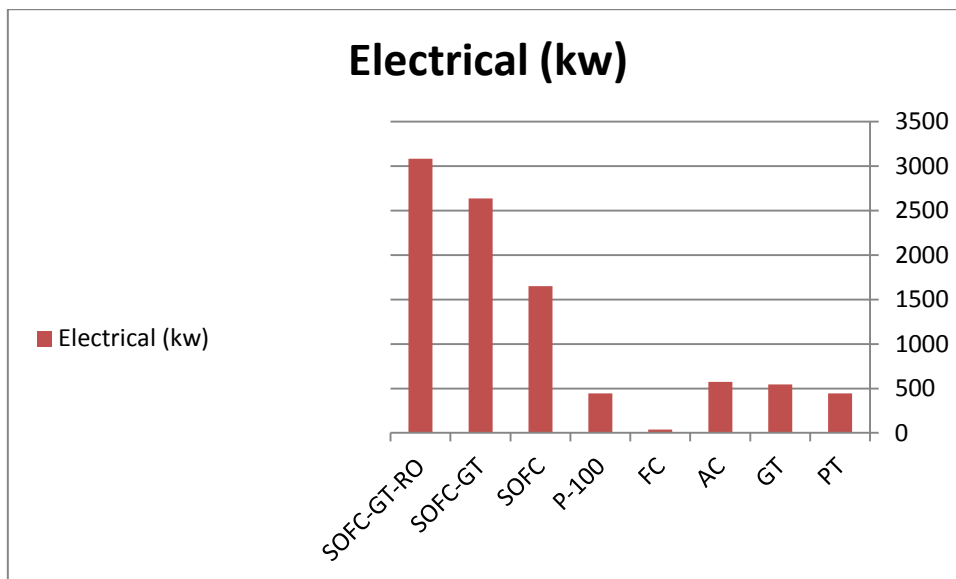
	Tubular Cells	Planar Cells
Specific Power (W/cm ²)	Low (0.2-0.25)	High (0.6-2.0)
Volumetric Power (W/cm ³)	Low	High
Manufacturing Cost (\$/kW)	High	Low
High Temperature Seals	Not necessary	Required

با توجه به جدول بالا پیل سوختی از نوع صفحه ای به دلیل توان مخصوص بالا و توان حجمی بالا همچنین قیمت پایین نسبت به نوع لوله ای آن بهتر و با صرفه تر و بهینه تر است.

جدول ۴-۱۹ توان الکتریکی تجهیزات و سیستم

Electrical (kw)	device
443	PT
544	GT
573.229	AC
36.9185	FC
443	P-100
1650	SOFC
2637	SOFC-GT
3080	SOFC-GT-RO

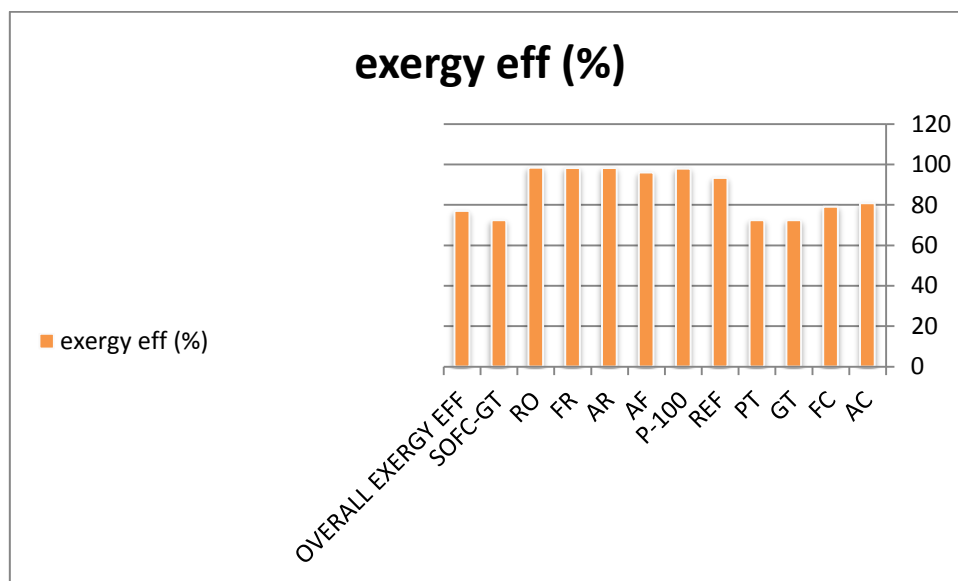
با توجه به اطلاعات جدول که توان الکتریکی تجهیزات و سیستم را نشان می دهد بیش ترین توان مربوط به پیل سوختی اکسید جامد و کمترین توان مربوط به کمپرسور سوخت می باشد .



نمودار ۴-۴ تغییرات توان الکتریکی سیستم

جدول ۴-۲۰ بازده انرژی سیستم

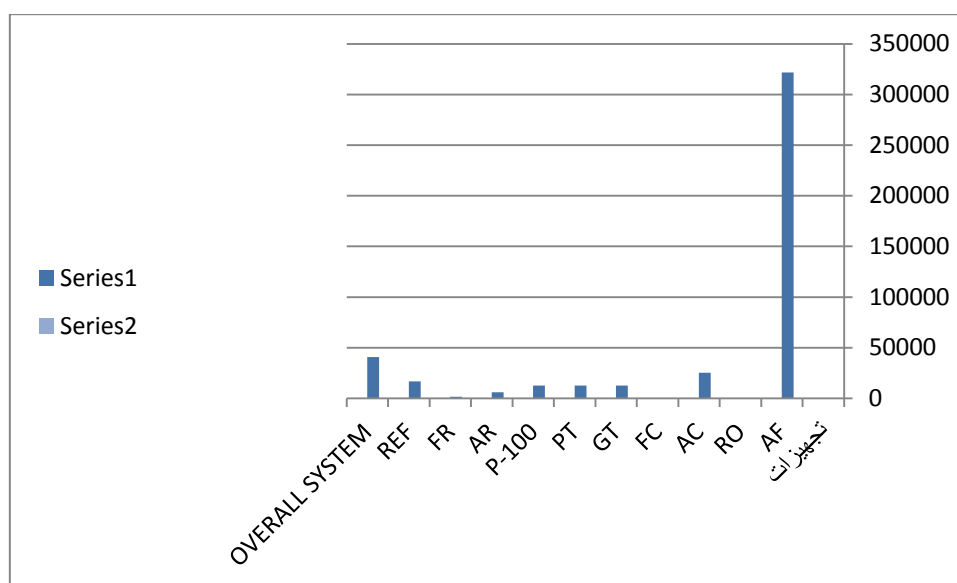
exergy eff (%)	devices system
80.84	AC
79.16	FC
72.5	GT
72.49	PT
93.4	REF
98	P-100
96	AF
98.2	AR
98.22	FR
98.38	RO
72.4	SOFC-GT
76.98	OVERALL EXERGY EFF



نمودار ۴-۵ تغییرات بازده انرژی سیستم و تجهیزات

جدول ۴-۲۱ میزان اتلاف انرژی تجهیزات و سیستم

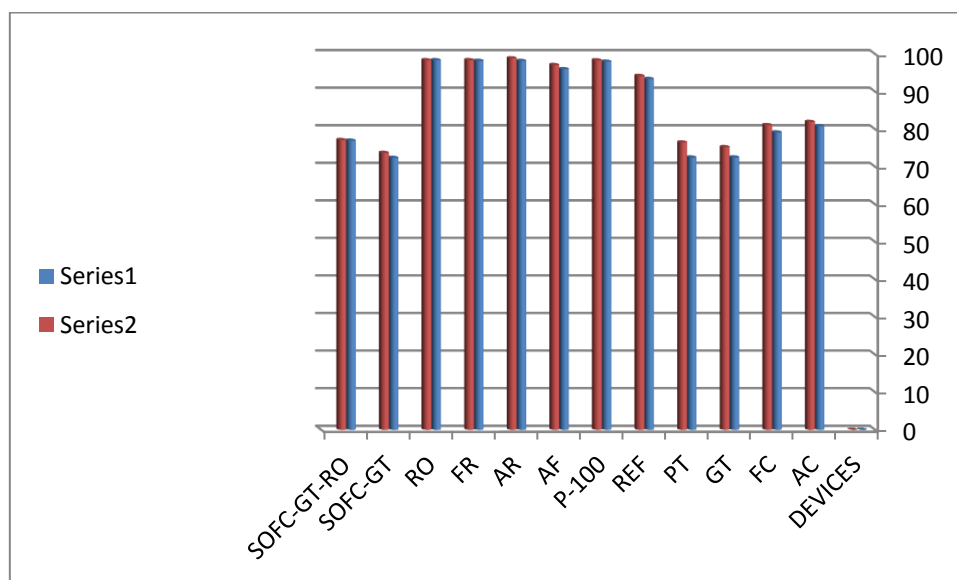
تجهیزات	میزان تخریب انرژی (کیلو ژول بر ساعت)
AF	321666.7
RO	0.153839
AC	25241.8
FC	0.167981
GT	12620.9
PT	12529.8
P-100	12529.8
AR	6157.2
FR	1527.41
REF	16687.1
OVERALL SYSTEM	409143.03182



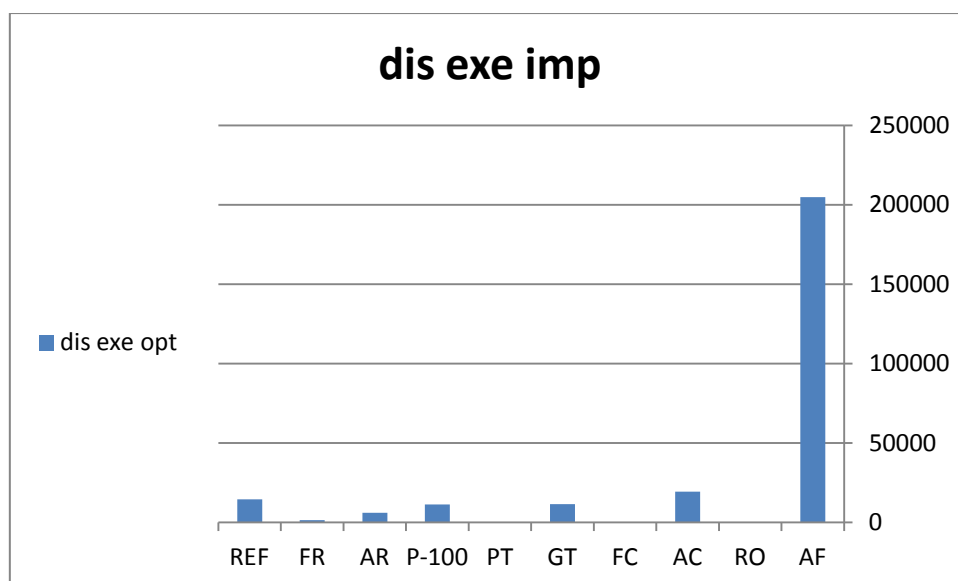
نمودار ۴-۲۶ تغییرات اتلاف انرژی تجهیزات و سیستم

جدول ۴-۲۲ بهبود بازده اگزرژی

DEVICES	EXERGY EFF	EXERGY eff improvement	
AC	80.84	81.96	
FC	79.16	81.11	
GT	72.5	75.24	
PT	72.49	76.5	
REF	93.4	94.2	
P-100	98	98.36	
AF	96	97.1	
AR	98.2	98.88	
FR	98.22	98.39	
RO	98.38	98.38	
SOFC-GT	72.4	73.71	
SOFC-GT-RO	76.98	77.15	



نمودار ۴-۷ بهبود بازده اگزرژی تجهیزات و سیستم



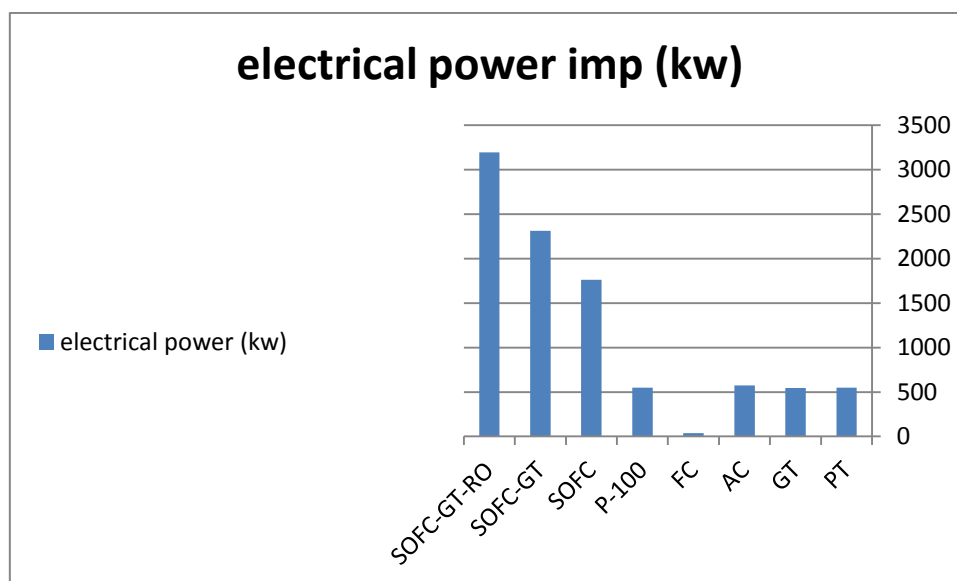
نمودار ۴-۸ بهبود اتلاف انرژی تجهیزات و سیستم

جدول ۴-۲۳ بهبود اتلاف انرژی

device	distruction exergy improvement (kj/h)
AF	204801.84
RO	0.15109
AC	19476
FC	0.15187
GT	11569.2
PT	11339.1
P-100	11339.1
AR	6005.8
FR	1498.2
REF	119661.032

-تخریب کلی انرژی سیستم برابر است با ۳۸۵۶۹۰,۵۷۴ کیلوژول بر ساعت می باشد.

۴-۱۱ نتایج توان الکتریکی سیستم



نمودار ۹-۴ بهبود توان الکتریکی تجهیزات و سیستم

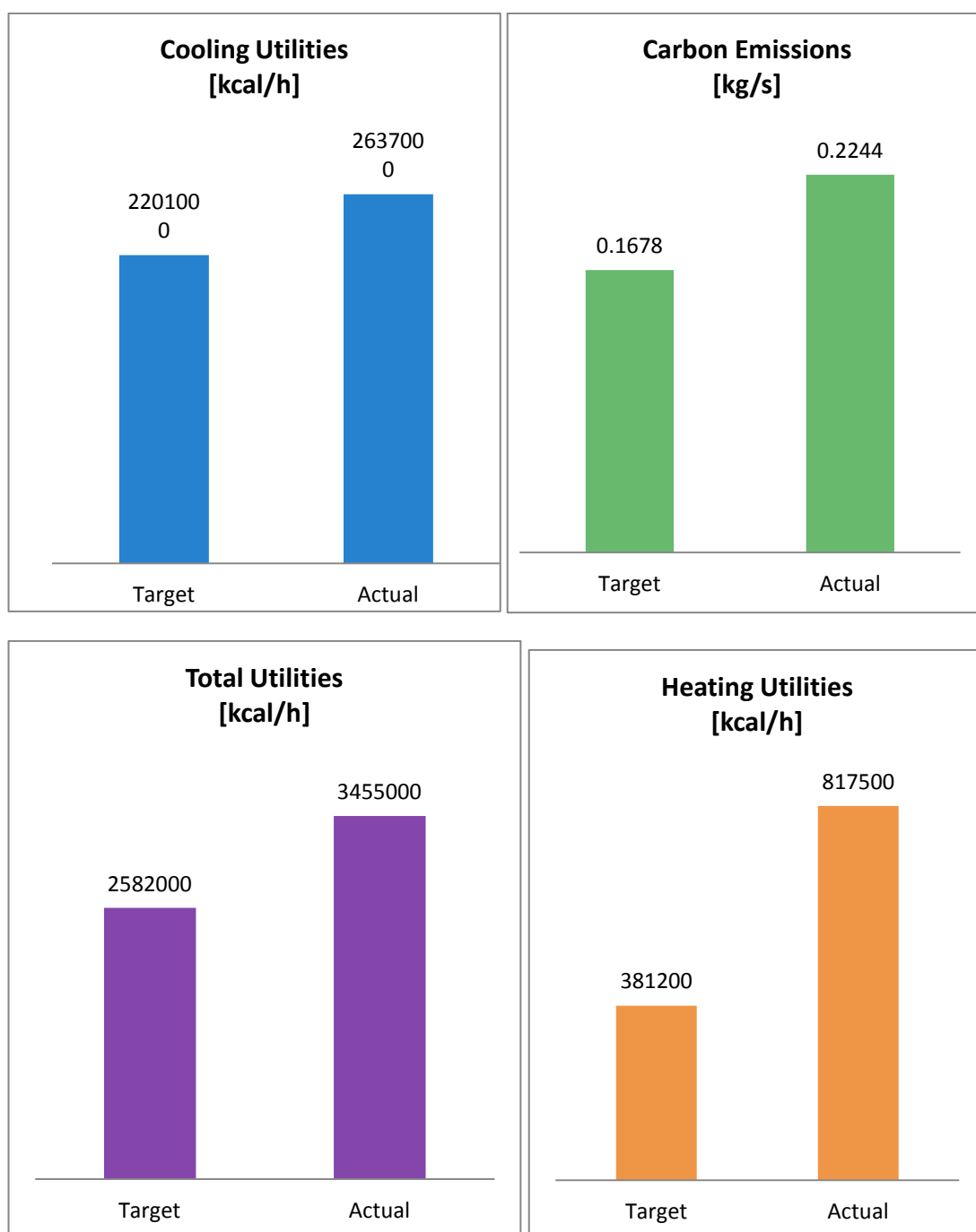
جدول ۴-۲۴ بهبود توان الکتریکی تجهیزات و سیستم

DEVICES	electrical power imp (kw)
PT	547.7
GT	546
AC	574.004
FC	37.11
P-100	547.7
SOFC	1762
SOFC-GT	2309.7
SOFC-GT-RO	3192

جدول ۴-۲۵ و نمودار ۴-۱۰ نتایج آنالیز انرژی

% of Actual	Available Savings	Target	Actual	Property
25.26	872300	2582000	3455000	Total Utilities [kcal/h]
53.37	436300	381200	817500	Heating Utilities [kcal/h]
16.54	436000	2201000	2637000	Cooling Utilities [kcal/h]
25.24	0.05664	0.1678	0.2244	Carbon Emissions [kg/s]

خلاصه نتایج آنالیز انرژی



برخی از نتایج سیستم:

ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد (ولت) : ۰,۷۷

قیمت سوخت : ۰,۳۰ (musd/year)

قیمت اسمز معکوس (قیمت عملکرد یا ارزش) : ۷۰۰ (usd) (۱ متر مکعب بر روز)

TDS آب ورودی: ۴۴,۲۵۴ (میلی گرم بر لیتر)

اسمز معکوس :

نوع غشاء : sw30hr-4401

ناحیه سطح فعال : ۰,۰۰۰۱ * ۷,۲۲ مترمربع

حداقل نمک زدگی : ۹۹,۵۵

PH (عملکرد متوالی): ۱۰-۳

فصل پنجم

نتیجه گیری کلی

۵-۱ نتایج :

در این قسمت برخی نتایج حاصل از پروژه ارائه خواهد شد. در بخش هزینه ها بیشترین هزینه ها مربوط به کمپرسور سوخت و هوا و پمپ می باشد. در بازده انرژی کل سیستم اسمز معکوس بیشترین بازده و ریفورمر کمترین بازده را دارا می باشد. همچنین آنالیز انرژی و اقتصادی سیستم و جریان و محصولات انجام شد که قیمت نهایی سیستم به دلیل استفاده از پمپ اسمز معکوس از ۳,۵ به حدود ۲,۱ دلار در هر متر مکعب کاهش یافت. از منظر انرژی و محیط زیستی نیز وجود سه آلایندگی شامل کربن مونوکسید و کربن دی اکسید و نیز اکسیدهای نیتروژن در محفظه احتراق به دلیل وجود اندکی احتراق ناقص ناشی می شود که با توجه به نتایج شبیه سازی تأثیرات محیط زیستی به ترتیب ۱۲,۸ و ۴۹,۳ درصد کاهش یافته و سبب افزایش راندمان انرژی کل شده است. همچنین هزینه انرژی ۱۸,۳ درصد کاهش یافته است. نوع صفحه ای پیل سوختی اکسید جامد به دلیل بازده بالا و قیمت پایین و حذف کربن و عدم رسوب اولویت دارد. راندمان انرژی کل سیستم ۷۶,۹۸ درصد بدست آمد که با توجه به اعتبار سنجی در قسمت پایانی پروژه نسبت به سایر کارهای قبل بازده بالاتری دارد. میزان اتلاف انرژی کل سیستم ۴۰۹۱۴۳,۰۳۲ کیلوژول بر ساعت محاسبه شد. در بهبود سازی بازده انرژی از ۷۶,۹۸ به ۷۷,۱۵ درصد افزایش یافت. و بهبود سازی اتلاف آن به ۳۸۵۶۹۰,۵۷۷ کیلوژول بر ساعت کاهش یافت. در بهبود توان الکتریکی نیز از ۳۰۸۰ کیلو وات به ۳۱۹۲ کیلو وات افزایش یافت.

۵-۲ پیشنهادات :

- ۱- استفاده از این سیستم در مناطق کویری و مناطق نزدیک رودخانه ها و منابع آبی.
- ۲- جایگزینی این سیستم به جای منابع فسیلی و آلایندگی.
- ۳- ایجاد یک نیروگاه کوچک پیل سوختی اکسید جامد در کنار نیروگاه های بزرگ برای کمک و تامین انرژی و حرارت.
- ۴- ایجاد بخش مدیریت و فناوری برای توسعه پیل های سوختی و فرهنگ سازی آن در جامعه.
- ۵- تامین منابع مالی برای توسعه این سیستم ها و سایر سیستم های تجدید پذیر.

فصل ششم

منابع

- (1) M. C. Williams, Fuel cell handbook, EG&G Technical Services, Inc., West Virginia, 2004.
- (2) J. Brouwer, "Hybrid Gas Turbine Fuel Cell Systems," National Fuel Cell Research Center, University of California, See also URL <http://www.nfrcr.uci.edu>
- (3) S. P. Harvey and H. J. Richter, "Gas Turbine Cycles with Solid Oxide Fuel Cells, Part I and II," Journal of Energy Resources Technology, 116, 1994, pp. 305-318.
- (4) G. Lee and f. Sudhoff, "Fuel Cell/Gas Turbine System Performance Studies," Fuel Cells '96 Review Meeting, Morgantown, West Virginia, August 20-21, 1996, DOE/METC/C-97/7278.
- (5) J. Chaney, R. Tharp, W. Wolf, A. Fuller and J. Hartvigson, "Fuel Cell/Micro Turbine Combined Cycle," Final Report, McDermott Technology, Inc. Alliance, 1999.
- (6) A. F. Massardo and F. Lubelli, "Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycles (IRSOFC-GT): Part I-Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 122, 2000, pp. 27-35.
- (7) N. F. Bessette and J. F. Pierre, "Status of Siemens Westinghouse Tubular Solid Oxide Fuel Cell Technology and Development Program," Proceedings of the 2000 Fuel Cell Seminar, Courtesy Associates, November 2000.
- (8) S. C. Singhal, "Advances in Solid Oxide Fuel Cells," Journal of Solid State Ionic, 135, 2000, pp.305-313.
- (9) H. Ide and et al., "Natural Gas Reformed Fuel Cell Power Generation System-a Comparison of Three Systems Efficiencies," 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington,DC, pp. 1571-1522, 1989.
- (10) P. Costamagna, L. Magistri and A.F. Massardo, "Design and Part-Load Performance of a Hybrid System Based on a Solid Oxide Fuel Cell Reactor and a Micro Gas Turbine," Journal of Power Sources, 96, No. 2, 2001, pp. 352-368.
- (11) J. Palsson, "Thermodynamic Modeling and Performance of Combined Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine System," Ph.D. Thesis, Department of Heat and Power Engineering, Lund University of Sweden, 2002.
- (12) A. Selimovic, "Modeling of Solid Oxide Fuel Cells Applied to the Analysis of Integrated Systems with Gas Turbines," Ph.D. Thesis, Department of Heat and Power Engineering, Lund University of Sweden, 2002.
- (13) J. Palsson, A. Selimovic and L. Sjunnesson, "Combined Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Systems for Efficient Power and Heat Generation," Journal of Power Sources, 86, 2000, pp. 442-448.

- (14) S. H. Chan, H. K. Ho and Y. Tian, "Modelling of Simple Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Power Plant," *Journal of Power Sources*, 109, No. 1, pp. 111-120, 2002.
- (15) H. Uechi, S. Kimijima and N. Kasagi, "Cycle Analysis of Gas Turbine-Fuel Cell Cycle Hybrid micro Generation System," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 126, 2004, pp.755-762.
- (16) K. Rajashekara, "Hybrid Fuel Cell Strategies for Clean Power Generation," *IEEE Transactions on industry applications*, 41, No. 3, 2005, pp. 682-689.
- (17) S. Motahar and A. A. Alamrajabi, "Exergy Based Performance Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell and Steam Injected Gas Turbine Hybrid Power System," *International journal of hydrogen*, 34, 2009, pp. 2396-2407.
- (18) T. W. Song and et al., "Performance Analysis of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Micro Gas Turbine Hybrid Power System Based on a Quasi-Two Dimensional Model," *Journal of Power Sources*, 142, 2005, pp. 30-42.
- (19) W. H. Lai and et al., "Experimental Simulation on the Integration of Solid Oxide Fuel Cell and Micro-Turbine Generation System," *Journal of Power Sources*, 171, 2007, pp. 130-139.
- (20) Y. Haseli, I. Dincer and G. F. Naterer, "Thermodynamic Modeling of a Gas Turbine Cycle Combined with a Solid Oxide Fuel Cell," *Journal of Hydrogen energy*, 33, 2008, pp. 5811-5822.
- (21) D. Cocco and V. Tola, "Externally Reformed Solid Oxide Fuel Cell-Micro-Gas Turbine (SOFC-MGT) Hybrid Systems Fueled by Methanol and Di-Methyl-Ether (DME)," *Journal of energy*, 34, 2009, pp. 2124-2130.
- (22) Y. Komatsu and S. Kimijima, "Performance Analysis for the Part-Load Operation of a Solid Oxide Fuel Cell-Micro Gas Turbine Hybrid System," *Journal of energy*, 35, 2010, pp. 982-988.
- (23) Reijalt M., "Hydrogen and fuel cell education in Europe: from when? And where? To here! And now", *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, 2010.
- (24) Williams M.C., *Fuel Cell Handbook*, 7th edition, EG&G Services Parsons, Science Applications International Corporation, Morgantown, 2004.
- (25) Casas Y., Dewulf J., Arteaga-Perez L., Morales M., Langenhove H.V., Rosa E., "Integration of solid oxide fuel cell in a sugar-ethanol factory: analysis of the efficiency and the Environmental profile of the products", *Journal of Cleaner Production* vol. 19, pp. 1395-1404, 2011.
- (26) Massardo AF., Lubelli F., "Internal reforming solid oxide fuel cell–gas turbine combined cycles (IRSOFC-GT)", *Transactions of the ASME. J Eng Gas Turbines Power*, PP. 27– 35, 2000.

- (27) Chan S.H., Ho H.K., Tian Y. "Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant", *Journal Power Sources*, PP. 111-120, 2001
- (28) Chan S.H., Ho H.K., Tian Y., "Multi-level modeling of SOFC–gas turbine hybrid system", *Int Journal Hydrogen Energy*, PP. 889-900, 2002.
- (29) Yang W.J., Park S.K., Kim T.S., Kim J.H., Sohn J.L., Ro S.T., "Design performance analysis of pressurized solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid systems considering temperature constraints", *Journal Power Sources*, PP. 462–473, 2006.
- (30) Park S.K., Oh K.S. and Kim T.S., "Analysis of the design of a pressurized SOFC hybrid system using a fixed gas turbine design ", *Journal Power Sources*, 170(1), PP.130–139.2007.
- (31) Haseli Y., Dincer I., Naterera, GF., "Thermodynamic Modeling of a gas turbine cycle combined with a solid oxide fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, PP. 5811–5822, 2008.
- (32) Haseli Y., Dincer I., Naterera GF., " Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power system with a solid oxide fuel cell through exergy ", *Thermochimica Acta*, 480(2), PP. 1–9, 2008.
- (33) Yoshida, T., Ide, H., Ueda, H. and Horiuchi, N., 1989, "Natural gas reformed fuel cell power generation systems-a comparison of three system efficiencies", In *Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Washington, DC, Vol.3, pp.1517–1522.
- (34) Lubelli, F. and Massardo, A.F., 1998, "Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycle (IRSOFC-GT), Part A: cell model and cycle thermodynamic analysis", *ASME*, No.98-GT-557.
- (35) Campanari, S. and Macchi, E., 1998, "Thermodynamic analysis of advanced power cycles Based upon solid oxide fuel cell, gas turbine and Rankin cycles", *ASME*, No.98-GT-585.
- (36) Singhal, S.C., 2000, "Advances in solid oxide fuel cells", *Journal of Solid State Ionic*, Vol.135, pp.305-313.
- (37) <http://www.powergeneration.siemense.com> .last update 24/12/2016
- (38) Chan, S.H., Khor, K.A. and Xia, Z.T., 2001, "A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness", *Journal of Power Sources*, Vol.93, pp.130-140.
- (39) Chan, S.H., Ho, H.K. and Tian, Y., 2002, "Modeling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant", *Journal of Power Sources*, Vol.109, pp.111-120. And Alemrajabi, A.A., March 2009,

- (40) Motahar, S. "Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vo.34, pp.2396- 2407.
- (41) Yixin, L., 2005, "Numerical simulation of a flat-tube high power density solid oxide fuel cell", School of Engineering, University of Pittsburgh, USA.
- (42) Arsalis A. Thermoeconomic modeling and parametric study of hybrid SOFC-gas turbine-steam turbine power plants ranging from 1.5 to 10 MWe. *J Power Sources* 2008;181(2):313e26
- (43) Akkaya AV, Sahin B, Erdem HH. An analysis of SOFC/GT CHP system based on exergetic performance criteria. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33(10):2566e77.
- (44) Yan ZQ, Wang M, Wang JF, Ma SL, Dai YP. The study of the waste heat power generation integrate system with the organic working medium driven by the solid oxide fuel cell in theory. *J Chin Soc Power Eng* 2013;33(7):560e6 [in Chinese .
- (45) Yan ZQ, Zhao P, Wang JF, Dai YP. Thermodynamic analysis of an SOFC-GT-ORC integrated power system with liquefied natural gas as heat sink. *Int J Hydrogen Energy*.
- (46) Wang JF, Yan ZQ, Ma SL, Dai YP. Thermodynamic analysis of an integrated power generation system driven by solid oxide fuel cell. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37(3):2535e45.
- (47) Guo T, Wang HX, Zhang SJ. Comparative analysis of CO₂- based transcritical Rankine cycle and HFC245fa-based subcritical organic Rankine cycle using low-temperature geothermal source. *Sci China Tech Sci* 2010;53:1638e46.
- (48) S.S. Shenvi, A.M. Isloor, A.F. Ismail, A review on RO membrane technology: developments and challenges, *Desalination* 365 (2015) 10–26.
- (49) J. Palsson, A. Selimovic, and L. Sjunnesson, "Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation," *Journal of Power Sources*, vol. 86, pp. 442-448, 2000.
- (50) P. Costamagna, L. Magistri, and A. F. Massardo, "Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine," *Journal of Power Sources*, vol. 96, pp. 352-368, 2001.
- (51) A. Selimovic and J. Palsson, "Networked solid oxide fuel cell stacks combined with a gas turbine cycle," *Journal of Power Sources*, vol. 106, pp. 76-82, 2002.
- (52) P. Kuchonthara, S. Bhattacharya, and A. Tsutsumi, "Energy recuperation in solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) combined system," *Journal of Power Sources*, vol. 117, pp. 7-13, 2003.

- (53) B. F. Möller, J. Arriagada, M. Assadi, and I. Potts, "Optimisation of an SOFC/GT system with CO₂-capture," *Journal of Power Sources*, Selected papers presented at the Eighth Grove Fuel Cell Symposium, vol. 131, pp. 320-326, 2004.
- (54) F. Calise, A. Palombo, and L. Vanoli, "Design and partial load exergy analysis of hybrid SOFC-GT power plant," *Journal of Power Sources*, vol. 158, pp. 225-244, 2006.
- (55) Zabihian F, Fung AS. Performance analysis of hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine cycle: application of alternative fuels. *Energy Convers Manag* 2013;76:571e80.
- (56) Zabihian F, Fung AS. Performance analysis of hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine cycle (part I): effects of fuel composition on output power. *J Energy Inst* 2014; 87:18e27.
- (57) Zabihian F, Fung AS. Performance analysis of hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine cycle (part II): effects of fuel composition on specific work and efficiency. *J Energy Inst* 2014; 87:28e34.
- (58) Sucipta M, Kimijima S, Suzuki K. Performance analysis of the SOFC-MGT hybrid system with gasified biomass fuel. *J Power Sources* 2007; 174:124e35.
- (59) Rokni M. Thermodynamic analysis of SOFC (solid oxide fuel cell)-Stirling hybrid plants using alternative fuels. *Energy* 2013; 61:87e97.
- (60) Palsson J , selimovic A , S junnesson L. Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation . *Journal of power source* 2000 ,86(2):442.448.
- (61) EL-Emam RS.Dencer I.Energy and exergy analyses of combined molten carbonate fuel cell gas turbine system.*International Journal of hydrogen energy*2011,36(15):8927-8935.
- (62) Wang J , yanz , ma S , daiy.Thermodynamic analysis of an integrated power generation system driven by solid oxide fuel cell.*International Journal of hydrogen Energy* 2012,37(3):2535-2545.
- (63) S.Sanaye , A.katebi , 4E analysis and multi objective optimization of amicro gas turbine and solid oxide fuel cell hybrid combined heat and power system , *Journal of power sources* , 247(2014)294-306.

Abstract

The solid oxide fuel cell is of great importance due to the flexibility and high temperature of its operation. The work is geared towards analyzing the economic and environmental exergy and exergy of a reverse osmosis gas turbine solid oxide fuel cell that helps simultaneously generate electricity and heat as well as water for desalinizing water resources. The project is simulated by Spenceris software. The total system exergy results are 76.98% and the system's loss is about 409143 kJ / h, and optimization was 77.15% and 385690 kJ / h, respectively. Economic and environmental analysis for the system was also performed. The electrical power of the system increased from 3080 kW to 3192 kW. This system will be among the most popular systems in the future due to its high efficiency and multi-functionality.

Key words

Solid oxide fuel cell (sofc) – gas turbine (gt) _ exergy _ exergo economic _ exergo environmental _ reverse osmosis (ro)



Energy Institute for Higher Education

Faculty of Engineering

Department Of Energy Systems Engineering _ Energy Systems

Thesis For:

Degree of Master of Science (M.Sc)

Title:

Exergy analysis (Economic Exergy and Environmental Exergy) a sofc-gt-ro
hybrid system.

Supervisor:

Dr. Ahmadi

Dr.yassi

By:

Mohammad Atefi Nejad

Winter/1396