

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه تبدیل انرژی

مدل سازی و بهبود عملکرد سیستم تولید همزمان گرمایش،

سرمایش و برق با محرک اولیه ی پیل سوختی

بهراد علی زاده خارکشی

استاد راهنما:

دکتر محمود چهارطاقی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۹۴

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه مهندسی تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای بهراد علی زاده خارکشی

تحت عنوان:

مدل سازی و بهبود عملکرد سیستم تولید همزمان گرمایش، سرمایش و برق با محرک اولیه ی پیل سوختی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			محمود چهارطاقی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر محمد ضامن		دکتر علی سررشته داری
			دکتر سید مجید هاشمیان
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ داستان زحمکش پدرم،

روان پاک مادرم

و قلب مہربان ہمسرم

ضمن سپاس و ستایش به درگاه ایزدمنان که به من توانایی داد که با استعانت از او بتوانم این پژوهش را انجام

دهم، بر خود لازم می بینم از دکترم می و تشویق جناب آقای دکتر محمود چهارطاتی، استاد راهبنا، که در طول

نگارش این مجموعه بار راهبنا بی همی عالمانه خود، سکاندار شایسته امی در هدایت این پایان نامه بوده اند، قدردانی

و تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب بهراد علی زاده خاركشی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه "مدل سازی و بهبود عملکرد سیستم تولید همزمان گرمایش، سرمایش و برق با محرک اولیه ی پیل سوختی" تحت راهنمایی دکتر چهارطاقی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود هست و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافته ای آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

سرعت بالای افزایش جمعیت و پیشرفت صنعت در دنیای امروز باعث شده تا در قرن حاضر سرعت مصرف سوخت‌های فسیلی به شدت افزایش یابد، همچنین از طرف دیگر با توجه به کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش نگران کننده میزان آلودگی‌های زیست محیطی، بسیاری از کشورها را بر آن داشته است تا به دنبال سیستم‌هایی باشند که از انرژی‌های نو به عنوان سوخت بهره ببرند و دارای راندمان بالاتری نسبت به سیستم‌های سنتی باشند.

در این پایان‌نامه دو آرایش از سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما برای استفاده از گرمای اتلافی پیل سوختی پلیمری پیشنهاد شده است، سیستم‌های پیشنهادی می‌توانند دارای کاربردهای ساختمانی باشند. این سیستم‌ها شامل پیل سوختی پلیمری؛ تانک ذخیره حرارتی؛ چیلر جذبی می-باشند، حرارت تولیدی در پیل سوختی توسط یک سیال عامل جذب شده است و قسمتی از این حرارت به ژنراتور چیلر جذبی برای تامین سرمایش و قسمت دیگر آن به تانک ذخیره حرارتی برای تامین گرمایش ساختمان داده شده است. مدل‌سازی این سیستم‌ها از چهار دیدگاه انرژی؛ انرژی؛ میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت و میزان کاهش آلاینده‌گی انجام شده است. پیل سوختی این سیستم‌ها تولید همزمان دارای توان الکتریکی ۳۸/۶۳ کیلووات و توان حرارتی ۳۹/۱۷ کیلووات است. راندمان پیل سوختی در آرایش اول ۳۷/۲۱٪ و در آرایش دوم ۳۲/۶۱٪ محاسبه شده است، در حالیکه وقتی از تانک ذخیره حرارتی و چیلر جذبی برای بهره بردن از حرارت اتلافی پیل استفاده شود، در آرایش اول راندمان انرژی به ۶۸٪ و در آرایش دوم به ۷۵/۸۳٪ می‌رسد. بیشترین بازگشت ناپذیری تولیدی در هر دو سیکل در پیل سوختی پلیمری رخ می‌دهد و بازگشت ناپذیری پیل در آرایش اول که سوخت ورودی به پیل هیدروژن است، ۴۷/۲۱ کیلووات و در حالت دوم که سوخت ورودی به مجموعه گاز متان است ۸۴/۲۱ کیلووات است. از لحاظ درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی در مقایسه با سیستم‌های سنتی تامین انرژی ساختمان‌ها در آرایش اول، میزان کاهش مصرف سوخت ۳۴٪

و میزان کاهش آلاینده‌گی ۲۵٪ بدست آمده ولی در آرایش دوم، میزان کاهش مصرف سوخت ۴۰/۲۳٪ و میزان کاهش آلاینده‌گی ۲۲/۷۵٪ محاسبه شده است. همچنین محاسبات نشان داد که با افزایش فشار کاری پیل سوختی رانده‌مان‌های انرژی و انرژی افزایش یافته است اما با افزایش فشار بالای چیلر جذبی و فشار کاری پیل ضریب عملکرد چیلر جذبی کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: سیستم تولید همزمان، انرژی، انرژی، درصد کاهش مصرف سوخت، درصد

کاهش آلاینده‌گی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

چهارطاقی م، علیزاده خارکشی ب، (۱۳۹۴) " تحلیل عملکرد یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما برپایه‌ی پیل سوختی پلیمری تحت شرایط کاری مختلف"، مجله علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دانشگاه تربیت مدرس تهران. (پذیرفته شده)

چهارطاقی م، علیزاده خارکشی ب، (۱۳۹۴) " تحلیل انرژی و انرژی و اگزرژی یک سیستم تولید همزمان کوچک بر پایه پیل سوختی پلیمری برای سرمایه‌ی جذب"، مجله علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، دانشگاه کاشان. (پذیرفته شده)

چهارطاقی م، علیزاده خارکشی ب، (۱۳۹۴) " تحلیل و مدلسازی انرژی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه‌ی پیل سوختی"، چهارمین کنفرانس تخصصی ترمودینامیک، سمنان.

چهارطاقی م، علیزاده خارکشی ب، (۱۳۹۴) " طراحی و مدلسازی یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت بر پایه‌ی پیل سوختی"، دومین کنفرانس ملی مدیریت انرژی‌های نو و پاک، دانشگاه شهید مفتح همدان.

۱	فصل اول: مقدمه	۱
۲	مقدمه	۱-۱
۵	بررسی سیستم‌های تولید همزمان	۲-۱
۵	مقدمه‌ای بر سیستم‌های تولید همزمان	۳-۱
۷	مقایسه سیستم‌های تولید همزمان با سیستم‌های سنتی تولید انرژی	۴-۱
۸	مزایای سیستم‌های تولید همزمان	۵-۱
۱۰	تجهیزات و اجزاء سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه	۶-۱
۱۱	۱-۶-۱-۱ محرک‌های اولیه	
۱۳	۱-۶-۱-۱ موتورهای رفت و برگشتی	
۱۴	۲-۱-۶-۱ توربین‌های گاز	
۱۵	۳-۱-۶-۱ میکرو توربین	
۱۷	۴-۱-۶-۱ توربین بخار	
۱۸	۵-۱-۶-۱ پیل سوختی	
۱۹	۱-۵-۱-۶-۱ پیل سوختی پلیمری	
۲۰	۲-۵-۱-۶-۱ نوع کربنات مذاب (MCFC):	
۲۲	۳-۵-۱-۶-۱ نوع فسفریک اسید (PAFC):	
۲۳	۴-۵-۱-۶-۱ نوع اکسید جامد (SOFC):	
۲۵	۵-۵-۱-۶-۱ نوع آلکالین (AFC):	
۲۶	۶-۵-۱-۶-۱ متانولی مستقیم (DMFC):	
۲۸	۶-۱-۶-۱ موتورهای استرلینگ	
۳۱	۷-۱-۶-۱ تجهیزات الکتریکی	
۳۱	۸-۱-۶-۱ دستگاه‌های بازیافت حرارت	
۳۲	۹-۱-۶-۱ چیلر جذبی	

۷-۱ جمع‌بندی..... ۳۳

فصل دوم: مروری بر کارهای پیشین..... ۳۵

۱-۲ مقدمه..... ۳۶

۲-۲ مروری بر تعدادی از کارهای انجام شده در زمینه CCHP..... ۳۶

۳-۲ تحقیقات پیشین صرف نظر از نوع محرک اولیه..... ۳۶

۴-۲ تحقیقات پیشین با توجه به نوع محرک اولیه..... ۳۹

۱-۴-۲ موتور احتراق داخلی..... ۳۹

۲-۴-۲ موتور استرلینگ..... ۴۰

۳-۴-۲ توربین بخار..... ۴۱

۴-۴-۲ توربین گاز..... ۴۱

۵-۴-۲ میکروتوربین..... ۴۲

۶-۴-۲ پیل سوختی..... ۴۲

۵-۲ معرفی کار حاضر..... ۴۷

فصل سوم: مدل‌سازی..... ۴۹

۱-۳ مقدمه..... ۵۰

۲-۳ فرضیات و روابط حاکم بر مدل‌سازی..... ۵۰

فرضیات:..... ۵۰

۳-۳ مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری..... ۵۱

۱-۳-۳ تحلیل قانون اول پیل سوختی پلیمری..... ۵۳

۲-۳-۳ تحلیل قانون دوم پیل سوختی پلیمری..... ۵۷

۴-۳ چیلر جذبی..... ۵۹

۱-۴-۳ تحلیل قانون اول چیلر جذبی..... ۵۹

۲-۴-۳ تحلیل قانون دوم چیلر جذبی..... ۶۲

۵-۳ بویلر و محفظه احتراق..... ۶۳

۶-۳ مبدل متان به هیدروژن..... ۶۵

۶۶	۱-۶-۳ مدل ترمودینامیکی مبدل متان به هیدروژن
۶۶	۷-۳ راندمان
۶۷	۱-۷-۳ راندمان انرژی
۶۸	۲-۷-۳ راندمان انرژی
۶۹	۸-۳ درصد کاهش مصرف سوختی
۷۰	۹-۳ کاهش آلاینده‌گی

فصل چهارم: شبیه‌سازی و ارائه نتایج ۷۳

۷۴	۱-۴ مقدمه
۷۴	۲-۴ آرایش سیکل
۷۴	۱-۲-۴ آرایش اول
۷۷	۱-۱-۲-۴ نتایج و بحث آرایش اول
۹۴	۲-۲-۴ آرایش دوم
۹۵	۱-۲-۲-۴ نتایج و بحث آرایش دوم

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۱۰۹

۱۱۰	۱-۵ مقدمه
۱۱۰	۲-۵ نتیجه‌گیری سیستم اول
۱۱۲	۳-۵ نتیجه‌گیری سیستم دوم
۱۱۴	۴-۵ نتیجه‌گیری کلی
۱۱۴	۵-۵ پیشنهادات
۱۱۶	مراجع

فهرست اشکال:

صفحه

- شکل (۱-۱): نمایی از یک سیستم CCHP برای تامین انرژی ساختمان ۴
- شکل (۲-۱): نمایی از یک سیستم سنتی برای تامین انرژی ساختمان ۵
- شکل (۳-۱): نمایی از یک سیستم تولید سه‌گانه ۶
- شکل (۴-۱): چند نمونه از محرک‌های اولیه سیستم‌های تولید همزمان ۱۲
- شکل (۵-۱): موتور ژنراتور ۱۲ سیلندر گازسوز با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلووات [۷] ۱۳
- شکل (۶-۱): توربین گاز با ظرفیت بسیار بالا ساخت شرکت زیمنس [۹] ۱۵
- شکل (۷-۱): نمونه‌ای از یک میکرو توربین ۶۰ کیلوواتی [۱۱] ۱۶
- شکل (۸-۱): توربین بخار [۷] ۱۷
- شکل (۹-۱): پیل سوختی با ظرفیت ۵ کیلووات [۱۴] ۲۸
- شکل (۱۰-۱): موتور استرلینگ ۳۵ کیلوواتی [۹] ۲۹
- شکل (۱۱-۱): نمونه یک مبدل سیستم تولید همزمان [۹] ۳۲
- شکل (۱-۳): نحوه‌ی عملکرد پیل سوختی پلیمری ۵۲
- شکل (۲-۳): نحوه‌ی عملکرد چیلر جذبی ۶۰
- شکل (۳-۳): نحوه‌ی عملکرد چیلر جذبی تک اثره ۶۰
- شکل (۴-۳): تقسیم بندی اگزرژی چیلر جذبی ۶۳
- شکل (۵-۳): نمای بویلر ۶۴
- شکل (۶-۳): مبدل متان به هیدروژن از نوع ریفورمر بخار [۷۱] ۶۵
- شکل (۷-۳): سیستم سنتی تامین انرژی یک ساختمان [۷۴] ۶۹
- شکل (۱-۴): شماتیک سیکل اول ۷۵

- شکل (۲-۴) فلوجارت مدل سازی سیستم..... ۸۳
- شکل (۳-۴): تاثیر ضریب استوکیومتری مصرف هیدروژن بر راندمان های انرژی سیستم..... ۸۴
- شکل (۴-۴): تاثیر ضریب مصرف هیدروژن بر راندمان های انرژی سیستم..... ۸۵
- شکل (۵-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان های انرژی سیستم..... ۸۶
- شکل (۶-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان های انرژی سیستم..... ۸۷
- شکل (۷-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر حرارت های تولیدی سیستم..... ۸۷
- شکل (۸-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر ضریب عملکرد چیلر جذبی..... ۸۸
- شکل (۹-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر بازگشت ناپذیری های پیل سوختی و چیلر جذبی..... ۸۹
- شکل (۱۰-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده گی..... ۹۰
- شکل (۱۱-۴): تاثیر فشار بالای چیلر جذبی بر عملکردهای سیستم..... ۹۰
- شکل (۱۲-۴): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر کار و حرارت تولیدی سیستم..... ۹۱
- شکل (۱۳-۴): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر راندمان ها..... ۹۲
- شکل (۱۴-۴): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر درصد کاهش مصرف سوخت، درصد کاهش تولید آلاینده گی و ضریب عملکرد چیلر جذبی..... ۹۳
- شکل (۱۵-۴): بازگشت ناپذیری اجزای سیستم..... ۹۳
- شکل (۱۶-۴): شماتیک آرایش دوم سیکل..... ۹۴
- شکل (۱۷-۴): تاثیر ضریب مصرف هیدروژن بر راندمان های انرژی سیستم..... ۹۸
- شکل (۱۸-۴): تاثیر ضریب مصرف هیدروژن بر راندمان های انرژی سیستم..... ۹۸
- شکل (۱۹-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان های انرژی سیستم..... ۹۹
- شکل (۲۰-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان های انرژی سیستم..... ۱۰۰
- شکل (۲۱-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر حرارت های تولیدی سیستم..... ۱۰۱

- شکل (۴-۲۲): تاثیر درصد از حداکثر توان بر ضریب عملکرد چیلر جذبی ۱۰۲
- شکل (۴-۲۳): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر بازگشت ناپذیری‌های پیل سوختی و چیلر جذبی ۱۰۲
- شکل (۴-۲۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی ۱۰۳
- شکل (۴-۲۵): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر راندمان‌ها ۱۰۴
- شکل (۴-۲۶): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر درصد کاهش مصرف سوخت، درصد کاهش تولید آلاینده‌گی و ضریب عملکرد چیلر جذبی ۱۰۵
- شکل (۴-۲۷): بازگشت ناپذیری اجزای سیستم ۱۰۵
- شکل (۴-۲۸): مقایسه‌ی راندمان‌های انرژی دو آرایش ۱۰۶
- شکل (۴-۲۹): مقایسه‌ی راندمان‌های انرژی دو آرایش ۱۰۶
- شکل (۴-۳۰): مقایسه‌ی COP, FESR, و CDER دو آرایش ۱۰۷

جدول (۱-۱): عملکرد موتورهای گازسوز با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۸].....	۱۴
جدول (۱-۲): عملکرد توربین گاز با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۱۰].....	۱۵
جدول (۱-۳): عملکرد چند نمونه میکرو توربین برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۱۱].....	۱۶
جدول (۱-۴): عملکرد توربین بخار با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۷].....	۱۸
جدول (۱-۵): مشخصات انواع پیل سوختی [۱۴].....	۲۸
جدول (۱-۶): مشخصات عملکرد موتور استرلینگ ۵۵ کیلوواتی برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۹].....	۳۰
جدول (۱-۷): مزایا، معایب و ظرفیت محرکه‌های اولیه [۱۵].....	۳۰
جدول (۱-۸): مقایسه ویژگی‌های محرکه‌های اولیه [۱۶].....	۳۱
جدول (۱-۳): اگزورزی‌های شیمیایی مواد [۶۶و۶۵].....	۵۹
جدول (۲-۳) واکنش‌های انجام شده در ریفورمر بخار.....	۶۷
جدول (۱-۴): پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی انرژی و اگزورزی پیل سوختی پلیمری [۱۵،۱۳].....	۷۸
جدول (۲-۴): پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی.....	۷۹
جدول (۳-۴): نتایج ناشی از مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری.....	۸۰
جدول (۴-۴) نتایج ناشی از مدل‌سازی ترمودینامیکی چیلر جذبی.....	۸۱
جدول (۵-۴): نتایج عملکرد چیلر جذبی.....	۸۱
جدول (۶-۴): پارامترهای ورودی برای تحلیل عملکرد کل سیکل.....	۸۲
جدول (۷-۴): نتایج ناشی از شبیه‌سازی کل سیکل.....	۸۲
جدول (۸-۴): نتایج ناشی از مدل‌سازی پیل سوختی آرایش دوم.....	۹۶
جدول (۹-۴): نتایج ناشی از مدل‌سازی چیلر جذبی.....	۹۷

جدول (۴-۱۰): نتایج ناشی از شبیه‌سازی کل سیکل ۹۷

جدول (۴-۱۱): نتایج ناشی از مدل‌سازی دو سیکل برای مقایسه ۱۰۸

فهرست علائم:

مساحت (m^2)	A_{cell}
ظرفیت گرمایی ویژه ($J mol^{-1} K^{-1}$)	C_i
ضریب عملکرد چیلر	COP_e
چگای جریان کاری پیل (A)	I
اگرژی (kW)	EX
اگرژی فیزیکی (kW)	ex_{ph}
اگرژی شیمیایی (kW)	ex_{ch}
ولتاژ نرنست (V)	E_{Nernst}
درصد کاهش مصرف سوخت	$FESR$
میزان کاهش مصرف سوخت (kJ)	FS
انتالپی ($kJ kg^{-1}$)	h
جریان کاری (A)	I
نرخ اگرژی (kW)	\dot{I}
چگالی جریان حدی ($A cm^{-2}$)	i_L
دبی جرمی ($kg s^{-1}$)	\dot{m}
دبی مولی ($mol s^{-1}$)	\dot{n}
تعداد مول	n_e
تعداد سلول	N_{cell}
فشار (bar)	P
حرارت (kW)	Q
مقاومت الکتریکی (Ω)	R
انتروپی ($kJ kg^{-1} K^{-1}$)	S
دما (K)	T
دما ($^{\circ}C$)	T
ولتاژ (V)	V
کار پیل سوختی (kW)	W_{fc}
کسر مولی	X

علائم یونانی

راندمان η

زیرنویس‌ها

حالت مرده 0

نقاط سیکل	۱ و ۲ و ...
به شکل حرارت	heat
قانون اول	I
مبدل حرارتی داخلی	IHE
قانون دوم	II
ورودی	in
به طور خالص	net
خروجی	out
کندانسور	C
اوپراتور	e
پمپ	P
توربین	T

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ مقدمه

با توجه به کاهش روزافزون منابع سوخت‌های فسیلی، افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و جمعیت کره زمین، نیاز به سیستم‌های تولید انرژی با راندمان بالا که مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی پایینی داشته باشند، یکی از موضوعات مهم و حیاتی دنیای امروز است. یکی از این سیستم‌ها که امروزه مورد بحث و نقد است، سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرما است.

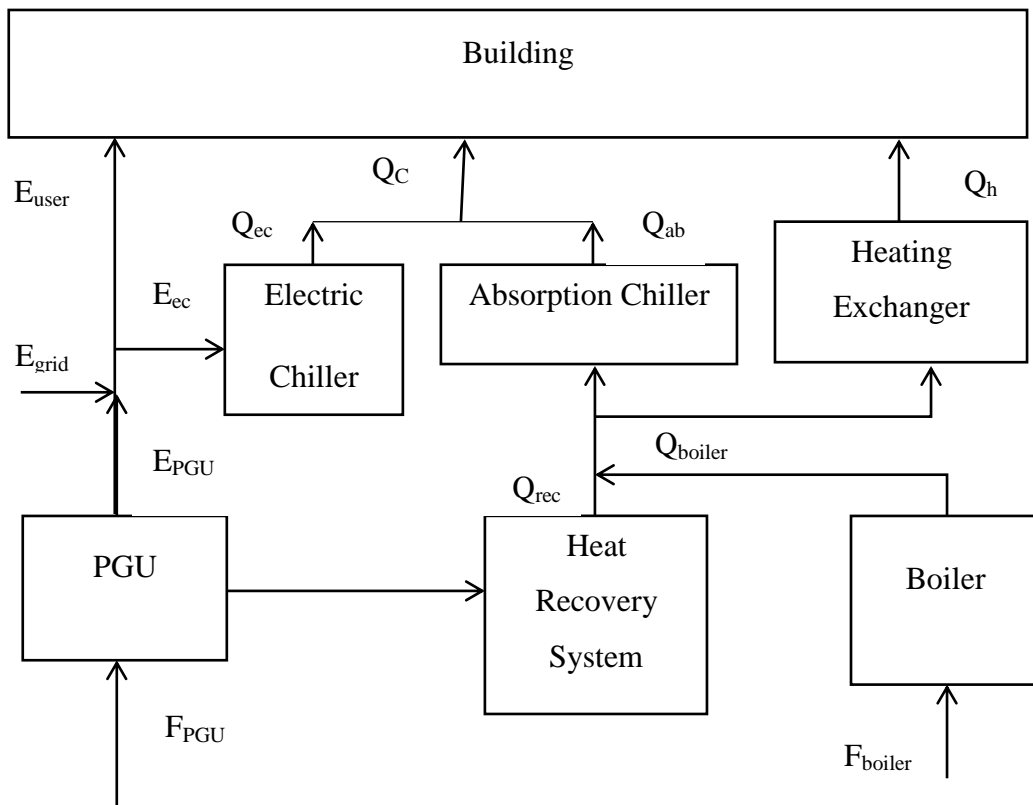
این سیستم‌ها راه‌حلی شناخته‌شده برای حل مشکلات قرن حاضر نظیر افزایش شدید تقاضای انرژی، آلاینده‌های زیست‌محیطی و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی است. سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرما سیستم‌هایی هستند که عموماً به تولید انرژی الکتریکی موردنیاز مصرف‌کننده در نزدیکی محل مصرف می‌پردازند و از قسمتی از گرمای اتلافی سیستم، برای ایجاد گرمایش، از قسمتی دیگر از گرمای اتلافی، یا انرژی الکتریکی برای تبرید استفاده می‌کنند و این کار باعث بالا رفتن راندمان این گونه از سیستم‌ها شده است.

این سیستم‌ها دارای کاربردهای متنوعی هستند که از آن جمله می‌توان به استفاده از این سیستم‌ها در هتل‌ها، بیمارستان‌ها، شهرک‌ها و کارخانه‌ها اشاره کرد. همچنین این سیستم‌ها دارای محرک‌های اولیه‌ی مختلفی مانند توربین گاز، موتور احتراقی، پیل سوختی، موتور استرلینگ می‌باشند که هر کدام از این محرک‌های اولیه دارای محدوده راندمان و میزان آلاینده‌ی مشخصی هستند. بسته به نوع کاربردی که مدنظر مصرف‌کننده است می‌توان محرک اولیه مناسب را برای این سیستم‌ها انتخاب نمود و با توجه به نوع محرک اولیه انتخابی می‌توان سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی مختلفی را برای استفاده از انرژی اتلافی آن‌ها استفاده کرد.

همان‌طور که از روش کار این سیستم‌ها برمی‌آید، این سیستم‌ها از گرمای اتلافی برای گرمایش و سرمایش استفاده می‌کنند که استفاده از گرمای اتلافی موجب بالا رفتن راندمان این نوع از سیستم‌ها شده است. این سیستم‌ها به دلیل استفاده از گرمای اتلافی، مصرف سوخت‌های فسیلی را تا حد زیادی کاهش می‌دهند و در نتیجه باعث کاهش تولید آلاینده‌ها می‌شوند. از سوی دیگر این سیستم‌ها عموماً

به تولید برق در نزدیک مصرف کننده می پردازند و در نتیجه از تلفات انتقال برق تا حد زیادی کاسته خواهد شد. یکی دیگر از مزایای این سیستمها این است که به طور پراکنده ولی با قدرت های پایین نسبت به نیروگاه های تولید برق سنتی در سطح کشورها حضور دارند، در نتیجه از لحاظ پدافند غیرعامل و متمرکز نبودن قدرت در یک مساحت محدود حائز اهمیت هستند. از سوی دیگر این سیستمها دارای قابلیت اطمینان بالایی هستند زیرا واحدهای تولیدی این سیستمها دارای قدرت کمی نسبت به نیروگاه های متمرکز قوی هستند و در صورت خرابی یک واحد تولیدی تعداد محدودی از مصرف کننده ها از داشتن برق محروم می گردند ولی در نیروگاه های بزرگ ممکن است برق یک شهر و یا محدوده وسیعی قطع می گردد. این سیستمها برخلاف نیروگاه های سنتی که دارای راندمان نسبتاً پایینی هستند، می توانند به راندمان کل حدود ۶۰٪ تا ۹۰٪ برسند [۱-۲]. در شکل (۱-۱) نیز نمونه ای از یک سیستم تولید همزمان مرسوم نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۱-۱) مشخص است در این سیستم F_{pgu} و F_{boiler} که حاصل ضرب ارزش حرارتی سوخت مورد استفاده در دبی سوخت واحد تولید قدرت^۱ و بویلر را نشان می دهد به بیان دیگر این پارامترها نمایانگر انرژی ورودی به سیستم است. پس از ورود انرژی به سیستم در PGU کار تولید می شود و غالباً درصد نسبتاً زیادی از انرژی ورودی به سیستم تولید همزمان در PGU به صورت حرارت تلف می شود و لذا برای استفاده از این حرارت، این انرژی اتلافی به سیستم بازیاب حرارتی داده می شود و از طرفی با توجه به نیاز مصرف کننده اگر انرژی حرارتی مورد نیاز تامین شده توسط واحد تولید قدرت پاسخ گوی مصرف کننده نباشد بویلر در مدار آمده و این کمبود انرژی را جبران می کند. انرژی حرارتی بازیاب شده در سیستم بازیاب حرارتی نیز به صورت حرارت به چیلر جذبی داده می شود اما اگر نیاز به سرمایش مصرف کننده بیش از اندازه ی تولید شده توسط چیلر جذبی باشد، چیلر الکتریکی نیز وارد مدار می شود و این کمبود انرژی را جبران می کند. از طرف دیگر نیز اگر مصرف انرژی الکتریکی ساختمان بیش از تولید انرژی الکتریکی توسط واحد تولید کننده قدرت باشد از شبکه برق خریداری می شود و اگر مصرف

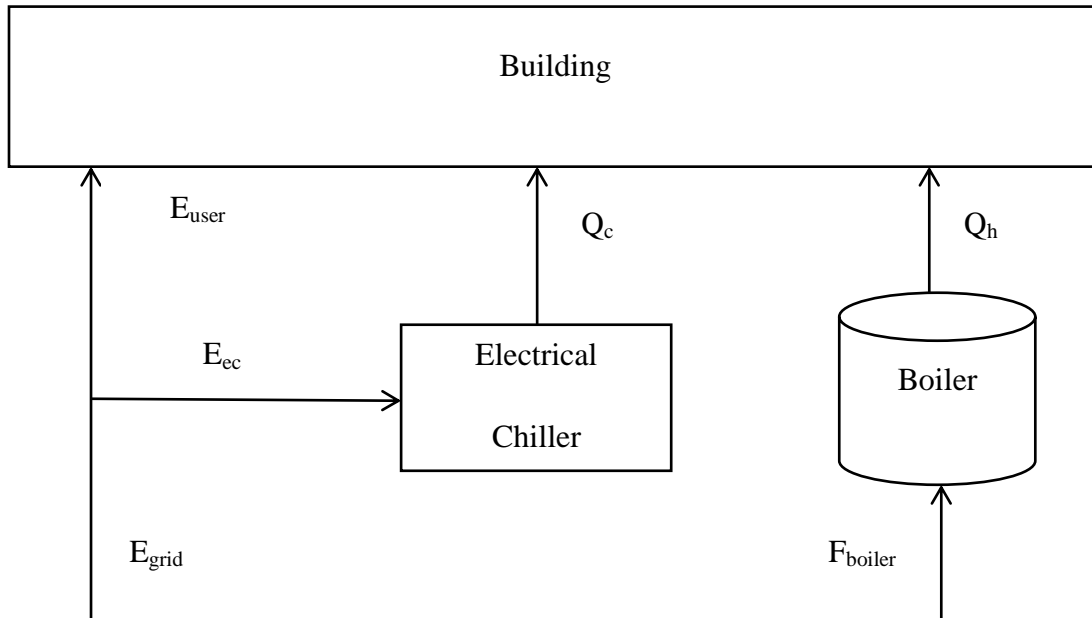
کمتر از تولید باشد هم برق تولیدی توسط واحد تولید کننده قدرت نیز به شبکه فروخته می‌شود. در نهایت نیز انرژی حرارتی مورد نیاز مصرف کننده نیز از انرژی اتلافی توسط PGU تامین می‌شود ولی مشابه انرژی الکتریکی و سرمایشی، اگر تولید کمتر از مصرف باشد نیز، برای جبران این کمبود بویلر وارد مدار می‌شود.



شکل (۱-۱): نمایی از یک سیستم CCHP برای تامین انرژی ساختمان

در شکل (۲-۱) نیز طرح یک سیستم سنتی برای رفع نیاز انرژی الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۲-۱) مشخص است در سیستم های سنتی انرژی الکتریکی توسط نیروگاه های تولید برق تامین شده، انرژی حرارتی و انرژی سرمایشی مورد نیاز ساختمان نیز توسط بویلر و برق شبکه تامین می‌گردد. همانطور که از مقایسه ی این دو شکل قابل مشاهده است تولید همزمان برق، حرارت و سرما دارای مزایایی در مقایسه با سیستم های سنتی هستند که از آن جمله می‌توان به نزدیکی محل تولید برق به مصرف کننده که کاهش تلفات ناشی از انتقال را در پی

دارد، مسئله پدافند غیرعامل که واحدهای تولید انرژی در سطح کشور پراکنده‌اند و بازیابی انرژی اتلافی از محرک اولیه و راندمان بالای این سیستم‌ها اشاره کرد.



شکل (۲-۱): نمایی از یک سیستم سنتی برای تامین انرژی ساختمان

۲-۱ بررسی سیستم‌های تولید همزمان

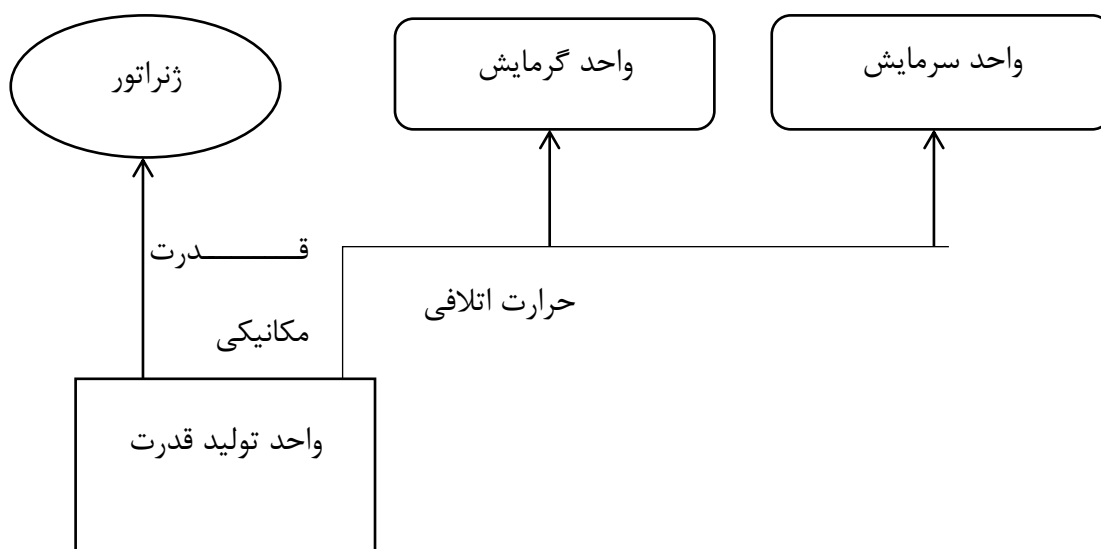
تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش در حقیقت تولید متوالی چند صورت مفید انرژی از یک منبع تولید انرژی (سوخت) است. در اغلب کاربردهای سیستم‌های تولید همزمان، انرژی شیمیایی سوخت به انرژی مکانیکی و گرمایی تبدیل می‌گردد. معمولاً انرژی مکانیکی برای تولید برق و انرژی گرمایی برای تولید گرمایش و سرمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۱ مقدمه‌ای بر سیستم‌های تولید همزمان

در چند سال اخیر مطالعات زیادی بر روی سیستم‌های تولید همزمان صورت گرفته است. این حجم از مطالعات نشان‌دهنده مزایا و کاربردهای فراوان این سیستم‌ها است. این مزایا باعث افزایش استفاده از

سیستم‌های تولید همزمان شده است. بیش از ۱۱٪ از انرژی برق تولیدی در کشورهای گروه ۸ (G8)^۱ و همچنین کشورهای برزیل، چین، هند، مکزیک و آفریقا جنوبی در سال ۲۰۰۸ از طریق سیستم‌های تولید همزمان تولید شده است. انتظار می‌رود این مقدار در سال ۲۰۱۵ به ۱۵٪ و در سال ۲۰۳۰ به ۲۴٪ برسد؛ به عبارت دیگر انتظار می‌رود میزان برق تولیدی توسط سیستم‌های تولید همزمان تا سال ۲۰۱۵ به ۴۳۰GW و تا سال ۲۰۳۰ به ۸۳۰GW برسد [۴]. از سیستم‌های تولید همزمان می‌توان در صنایع غذایی، فرودگاه‌ها، مراکز خرید، هتل‌ها، بیمارستان‌ها و خانه‌ها استفاده کرد.

شکل (۳-۱) سیستم تولید همزمان سه‌گانه^۲ را نشان می‌دهد:



شکل (۳-۱): نمایی از یک سیستم تولید سه‌گانه

سیستم تولید همزمان سه‌گانه از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شود:

- واحد تولید قدرت که به عنوان محرک اولیه شناخته می‌شود، مانند توربین گاز^۳
- واحد سرمایش، مانند چیلر جذبی

¹ Group8

² Trigeneration

³ Gas Turbine

- واحد گرمایش، مانند کوئل حرارتی

فرآیند انرژی در سیستم‌های تولید همزمان به شرح زیر است:

- ۱- در واحد تولید قدرت، قدرت مکانیکی تولید می‌شود.
 - ۲- قدرت مکانیکی تولیدشده از طریق ژنراتور برق تولید می‌کند.
 - ۳- حرارت اتلافی تولیدشده در واحد تولید قدرت، بازیافت می‌شود.
 - ۴- همه یا بخشی از حرارت اتلافی بازیافت شده برای برطرف کردن نیاز گرمایشی به کار می‌رود.
 - ۵- همه یا بخشی از حرارت اتلافی بازیافت شده برای برطرف کردن نیاز سرمایشی به کار می‌رود.
- برای استفاده بهینه از سیستم تولید همزمان باید سیستم تولید همزمان به اندازه کافی انعطاف‌پذیر باشد تا بتواند پاسخگوی نیازهای گرمایشی و سرمایشی کاربران باشد.

۴-۱ مقایسه سیستم‌های تولید همزمان با سیستم‌های سنتی تولید انرژی

در روش‌های سنتی تولید انرژی الکتریکی که انرژی شیمیایی سوخت در نیروگاه‌های بزرگ به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد، معمولاً بخش اعظمی از انرژی گرمایی به دست آمده از سوخت به محیط تخلیه شده و تلف می‌گردد. از طرف دیگر امروزه اغلب مشترکان صنعتی به طور خاص و مشترکان بخش‌های مسکونی، تجاری و عمومی به طور عام نیازهای حرارتی در فرآیندهای مختلف و نیز بارهای گرمایش از جمله آب، بخار و هوای گرم مورد نیاز خود را با استفاده از بویلرها و یا پکیج‌های حرارتی^۱ تأمین می‌نمایند. معمولاً در این سامانه‌های حرارتی نیز قسمتی از انرژی گرمایی به دست آمده از سوخت به هدر می‌رود. در مقایسه با سیستم‌های تولید انرژی سنتی، سیستم تولید همزمان قابلیت تأمین حداقل بخشی از بار الکتریکی مورد نیاز را دارا بوده و ضمن بازیافت گرمای اتلافی، آن را به

^۱ Thermal Packages

منظور تأمین نیازهای گرمایشی و سرمایشی کاربران مورد استفاده قرار می‌دهد. به این ترتیب سیستم تولید همزمان قادر به بهره‌برداری بیشتر از انرژی حرارتی سوخت ورودی به سیستم است [۵].

۱-۵ مزایای سیستم‌های تولید همزمان

سیستم تولید همزمان دارای مزایای فراوانی است که از جمله آن می‌توان به افزایش راندمان نیروگاه، کاهش انرژی‌های تلف‌شده، کاهش هزینه‌های اجرا، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده بهتر از منابع انرژی، کوتاه‌تر شدن خطوط انتقال انرژی، تولید چندگانه انرژی، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش احتمال خرابی شبکه اشاره کرد. در ادامه به طور اجمالی به بررسی این مزایا می‌پردازیم.

- افزایش راندمان نیروگاه و کاهش هزینه‌ها: استفاده از سیستم تولید همزمان باعث افزایش راندمان کلی نیروگاه و کاهش هزینه‌های اجرا می‌شود. بازده کلی نیروگاه‌های معمولی^۱ که با سوخت فسیلی و یک محرک اولیه کار می‌کنند کمتر از ۳۹٪ است. این بدان معنی است که بیش از ۶۰٪ از ارزش حرارتی سوخت ورودی نیروگاه، هدر می‌رود. بازده کلی نیروگاهی که برق و حرارت را به طور جداگانه تولید می‌کند حدود ۶۰٪ است که با استفاده از حرارت تلف‌شده توسط محرک اولیه در سیستم‌های تولید همزمان میزان راندمان به ۸۰٪ می‌رسد. در سیستم‌های تولید همزمان با استفاده از حرارت اتلافی در قسمت تولید قدرت، نیازهای گرمایشی و سرمایشی را بدون استفاده از سوخت اضافی برطرف می‌کنند. در مقابل، در نیروگاه‌های معمولی نیاز به سوخت اضافی و منابع انرژی بیشتری وجود دارد. پس خروجی یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه با وجود مصرف سوخت کمتر برابر با خروجی یک نیروگاه معمولی است؛ بنابراین در سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه برای تولید انرژی مفید مورد نیاز هزینه کمتری مصرف می‌شود [۴].

¹ Conventional Power Plants

- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای: استفاده از سیستم تولید همزمان سه‌گانه باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG)^۱ می‌شود. همان‌طور که بیان شد سیستم تولید همزمان سه‌گانه نسبت به یک نیروگاه معمولی از سوخت کمتری استفاده می‌کند. در نتیجه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط این سیستم‌ها کمتر خواهد بود. انتظار می‌رود در سال ۲۰۱۵ به خاطر استفاده از سیستم‌های تولید همزمان ۱۷۰ MT/year گاز CO₂ کمتری تولید شود و در سال ۲۰۳۰ این مقدار به عدد ۹۵۰ MT/year برسد. اگرچه انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط سیستم‌های تولید همزمان به مراتب کمتر از نیروگاه‌های معمولی است اما معمولاً این سیستم‌ها در نزدیکی مصرف‌کننده ساخته می‌شوند، در حالی که نیروگاه‌های معمولی در فاصله نسبتاً زیادی نسبت به مصرف‌کننده قرار دارند؛ بنابراین گازهای گلخانه‌ای تولیدشده توسط سیستم‌های تولید همزمان بسیار نزدیک به مصرف‌کننده تولید می‌شوند [۶].

- کوتاه‌تر شدن خطوط انتقال انرژی: از آنجایی که سیستم‌های تولید همزمان در نزدیکی مصرف‌کننده ساخته می‌شوند، نیاز به خطوط انتقال برق کمتری دارند که باعث کاهش هزینه و همچنین کاهش تلفات انرژی می‌شود. تولید مرسوم برق به این صورت است که نیروگاه‌های بزرگ و متمرکز در چند نقطه، برق همه مصرف‌کنندگان را تأمین می‌کنند. این بدان معنی است که فاصله بین مصرف‌کننده نهایی با نیروگاه برق زیاد است و باید از خطوط انتقال برق بسیار زیادی استفاده شود. احداث خطوط برق طولانی بسیار پر هزینه است و از طرف دیگر این خطوط طولانی باعث اتلاف انرژی زیادی می‌شوند. تلفات ناشی از انتقال و توزیع برق از نیروگاه‌های متمرکز به مصرف‌کننده نهایی به میزان ۹٪ است. در مقابل تلفات ناشی از انتقال و توزیع برق توسط سیستم‌های تولید همزمان به مراتب کمتر از نیروگاه‌های متمرکز است.

^۱ Green House Gas

- استفاده بهتر از منابع انرژی: سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه به میزان مورد نیاز انرژی تولید می‌کنند. سیستم‌های تولید همزمان در نزدیکی مصرف‌کننده ساخته می‌شوند و می‌توانیم مقدار انرژی مورد نیاز را به راحتی پیش‌بینی کرد؛ بنابراین انرژی به میزان مورد نیاز تولید می‌شود [۶].

- افزایش قابلیت اطمینان: سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه قابلیت اطمینان بالایی دارند. به عنوان مثال خاموشی که در سال ۲۰۰۳ در قسمت شمال شرقی کشور آمریکا رخ داد باعث ضرر چند میلیارد دلاری شد. بسیاری از بیمارستان‌ها در نیویورک به خاطر این کمبود برق آسیب دیدند. در سال ۱۹۹۸ حادثه‌ی دیگری در کشورهای کانادا و آمریکا رخ داد. خطوط انتقال برق و مراکز توزیع برق به خاطر طوفان آسیب دید. در این طوفان بیش از ۳۰۰۰۰ مرکز توزیع برق و ۱۰۰۰ دکل انتقال برق ولتاژ بالا آسیب دیدند. بر اثر این طوفان بیش از ۵ میلیون نفر از مردم برق خود را از دست دادند. نیروگاه‌های غیرمتمرکز یا همان سیستم‌های تولید همزمان دارای قابلیت اطمینان بالایی می‌باشند چرا که به خاطر خطوط انتقال برق کم و مراکز توزیع ناچیز احتمال خرابی شبکه بسیار پایین می‌آید [۴].

مزایای ذکرشده باعث ترغیب محققان و مهندسان برای توسعه هر چه بیشتر سیستم‌های تولید همزمان شده است.

۱-۶ تجهیزات و اجزاء سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه

سیستم‌های تولید همزمان شامل چندین دستگاه عمده و بسیاری اجزاء کوچک‌تر می‌باشند. در این قسمت به معرفی و تشریح آن‌ها می‌پردازیم.

- محرک‌های اولیه

- تجهیزات الکتریکی

- دستگاه‌های بازیابی حرارت

- چیلرهای جذبی

۱-۶-۱-۱ محرک‌های اولیه

محرک اولیه جزء اصلی سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه است؛ بنابراین یکی از دغدغه‌های عمده مهندسان انتخاب یک محرک اولیه مناسب است. از انواع محرک‌های اولیه، موتورهای رفت و برگشتی^۱، توربین‌های گاز^۲، میکرو توربین‌ها^۳، توربین‌های بخار^۴، پیل‌های سوختی^۵ و موتورهای استرلینگ^۶ را می‌توان نام برد. در شکل (۱-۴) چند نمونه از محرک‌های اولیه نشان داده شده است.

برای انتخاب یک محرک اولیه مناسب موارد زیر باید مورد توجه قرار گیرد:

- تقاضا بار الکتریکی با توجه به راندمان قدرت و امکان استفاده از چند محرک اولیه محاسبه شود.

- مقدار کل حرارت مورد نیاز برای پاسخگویی به تقاضای گرمایشی و سرمایشی مصرف‌کننده محاسبه شود. بر اساس این تقاضاها، نسبت قدرت به گرمایش و سرمایش برای نیروگاه مطلوب محاسبه شود.

- توانایی محرک اولیه برای عمل کردن با بیش از یک نوع سوخت که به انعطاف‌پذیری محرک اولیه می‌افزاید. از طرف دیگر نوع سوخت بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیرگذار است. برای مثال، انتشار گازهای گلخانه‌ای از احتراق گاز طبیعی کمتر از احتراق دیزل است.

¹ Reciprocating engines

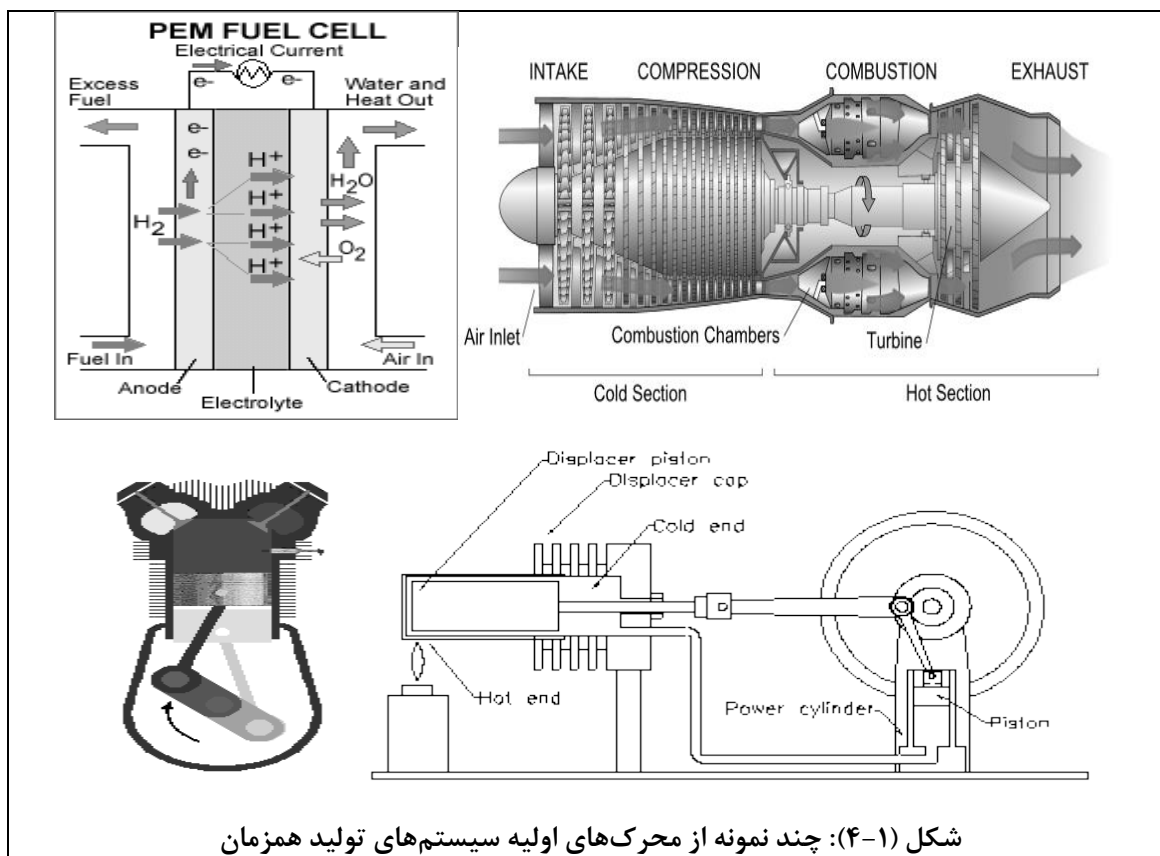
² Gas Turbines

³ MicroTurbines

⁴ Steam Turbines

⁵ Fuel Cells

⁶ Stirling Engines

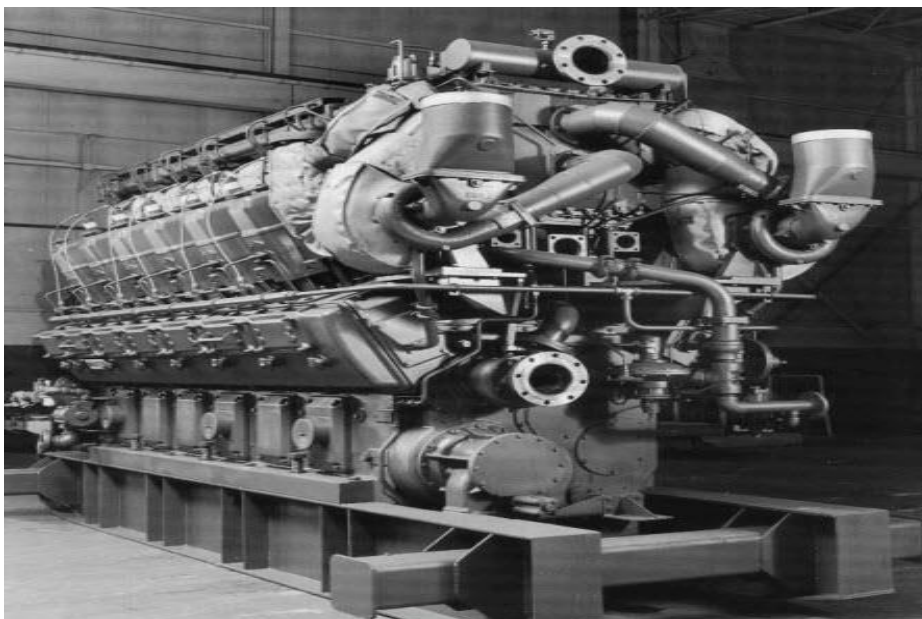


شکل (۴-۱): چند نمونه از محرک‌های اولیه سیستم‌های تولید همزمان

- انتخاب مکان سیستم تولید همزمان دارای محدودیت‌هایی از قبیل میزان آلودگی صوتی و میزان انتشار گاز گلخانه‌ای در محل مصرف است. همچنین ابعاد نیروگاه برای انتخاب مکان نیروگاه اهمیت دارد؛ بنابراین باید میزان آلودگی صوتی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان ظرفیت محرک اولیه به وضوح تعریف شده باشد.
- از یک محرک اولیه به عنوان یک سیستم پشتیبانی برای مواقع ضروری می‌توان استفاده کرد. در این صورت باید زمان راه‌اندازی در نظر گرفته شود.
- نوع سوخت در هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری تأثیرگذار است. نوع سوخت ممکن است بر طول عمر پوشش داخلی محرک اولیه تأثیرگذار باشد، در نتیجه تعمیر و نگهداری بیشتری نیاز شود. در ادامه چند نوع از محرک‌های اولیه معرفی می‌شوند.

۱-۱-۶-۱ موتورهای رفت و برگشتی

موتورهای رفت و برگشتی رایج‌ترین موتورهای احتراق داخلی^۱ می‌باشند که در آن‌ها انرژی شیمیایی سوخت در داخل محفظه سیلندر پس از احتراق به انرژی مکانیکی و انرژی گرمایی تبدیل می‌گردد. این گونه موتورها برای کاربردهای مختلفی از جمله خودروهای سبک، کامیون‌ها، ماشین‌آلات ساختمانی، تجهیزات معدن، ماشین‌آلات کشاورزی، کشتی‌ها، ناوگان‌های ریلی و نیز گستره متنوعی از تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. ظرفیت‌های رایج برای تولید همزمان برق و گرما برای این موتورها معمولاً تا بیش از ۵ مگاوات است. موتورهای رفت و برگشتی مورد استفاده برای تولید همزمان برق و گرما بازدهی بسیار خوبی داشته و از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار هستند. این گونه موتورها در میان سایر محرکه‌های اولیه با ظرفیت مشابه دارای بیش‌ترین بازدهی حرارتی می‌باشند [۷].



شکل (۱-۵): موتور ژنراتور ۱۲ سیلندر گازسوز با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلووات [۷]

در شکل (۱-۶) موتور ژنراتور ۱۲ سیلندر گازسوز با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلووات نشان داده شده است. در جدول (۱-۱) عملکرد موتورهای رفت و برگشتی گازسوز با ظرفیت‌های مختلف نشان داده شده است.

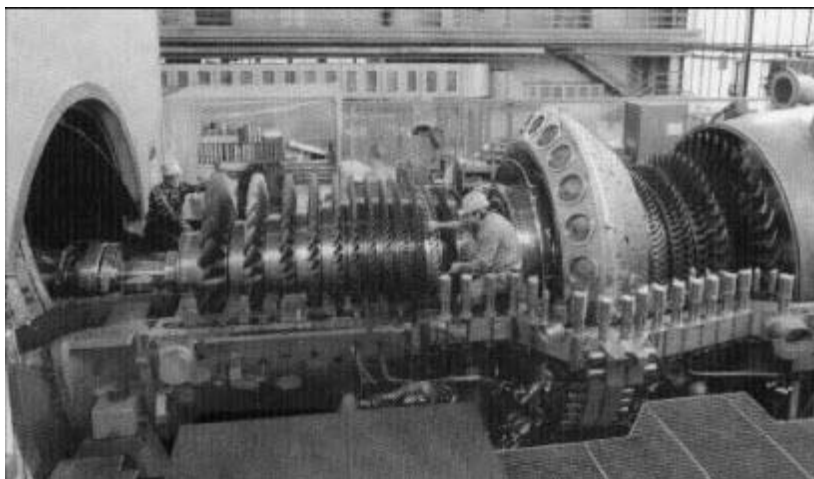
^۱ Internal Combustion

جدول (۱-۱): عملکرد موتورهای گازسوز با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۸]

مشخصات و راندمان	واحد	موتور ۱	موتور ۲	موتور ۳	موتور ۴	موتور ۵
ظرفیت الکتریکی	kW	۱۰۰	۳۰۰	۸۰۰	۳۰۰۰	۵۰۰۰
ظرفیت حرارتی	kW	۱۲۰۰۰	۹۸۶۶	۹۷۶۰	۹۴۹۲	۸۷۵۸
راندمان الکتریکی	%	۲۸/۴	۳۴/۶	۳۵	۳۶	۳۹
راندمان کل	%	۷۹	۷۸	۷۹	۷۳	۷۴

۱-۶-۱-۲ توربین‌های گاز

توربین‌های گاز از اواخر دهه ۱۹۳۰ میلادی به منظور تولید برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این محرکه‌ها از ویژگی‌هایی چون سبک‌وزنی، سادگی، تنوع و قابلیت اطمینان بسیار بالا برخوردار می‌باشند. بهره‌برداری از این نوع فناوری و نیز نصب و راه‌اندازی آن از سادگی و مطلوبیت خوبی برخوردار است. در حال حاضر توربین‌های گاز با ظرفیت‌هایی در محدوده ۵۰۰ کیلووات تا ۲۵۰ مگاوات در دسترس می‌باشند. این نوع محرکه‌ها را می‌توان فقط برای تولید برق و یا تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش مورد استفاده قرار داد. امروزه توربین‌های گاز که فقط برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند با بازدهی تا محدوده ۴۰٪ به صورت تجاری در دسترس می‌باشند. به طور کلی، گازهای احتراق خارج شونده از توربین‌های گاز کیفیت حرارتی بالایی داشته و قابلیت استفاده در سیستم‌های تولید همزمان را دارا می‌باشند. با بهره‌گیری از حرارت بازیافت شده از گازهای خروجی امکان دست‌یابی به بازدهی کلی سیستم در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد میسر می‌گردد [۹]. در شکل (۱-۶) توربین گاز با ظرفیت بسیار بالا ساخت شرکت زیمنس نشان داده شده است.



شکل (۱-۶): توربین گاز با ظرفیت بسیار بالا ساخت شرکت زیمنس [۹]

در جدول (۱-۲) عملکرد توربین گاز با ظرفیت‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول (۱-۲): عملکرد توربین گاز با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۱۰]

مشخصات و راندمان	واحد	توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳	توربین ۴	توربین ۵
ظرفیت الکتریکی	kW	۱۱۵۰	۵۴۵۷	۱۰۲۳۹	۲۵۰۰۰	۴۰۰۰۰
ظرفیت حرارتی	kW	۱۶۰۴۷	۱۲۳۱۲	۱۲۰۰۱	۹۹۴۵	۹۲۲۰
راندمان الکتریکی	%	۲۱/۲۷	۲۷/۷۲	۲۸/۴۴	۳۴/۳۰	۳۷
راندمان کل	%	۶۶/۳	۶۹/۸	۶۸/۴	۷۰/۷	۷۲/۱

۱-۶-۱-۳ میکرو توربین

میکرو توربین، تکنولوژی توربین گازی توسعه یافته در مقیاس کوچک تر است. این تکنولوژی اساساً برای کاربرد در بخش حمل و نقل توسعه یافت اما امروزه به عنوان روشی برای تولید برق در نظر گرفته شده است. این محرکه‌ها که از سوخت‌های گازی و مایع استفاده می‌نمایند دارای سرعت دورانی بسیار

زیادی می‌باشند. میکرو توربین‌ها در حدود سال ۱۹۹۷ میلادی به صورت آزمایشی مورد بهره‌برداری قرار گرفته و از سال ۲۰۰۰ میلادی به صورت تجاری وارد بازار شدند. محدوده ظرفیت‌های در دسترس و یا در حال توسعه میکرو توربین‌ها از ۳۰ تا ۲۵۰ کیلووات است در حالی که ظرفیت توربین گازها معمولاً از ۵۰۰ کیلووات تا ۲۵۰ مگاوات است. مشابه توربین گازهای بزرگ، میکرو توربین‌ها را می‌توان در حالت فقط تولید برق و یا در سیستم‌های تولید همزمان مورد استفاده قرار داد. این توربین‌ها می‌توانند از سوخت‌های متنوعی از جمله گاز طبیعی و سوخت‌های مایع مثل بنزین، نفت سفید و گازوئیل استفاده نمایند [۱۱]. در شکل (۷-۱) نمونه‌ای از یک میکرو توربین ۶۰ کیلو واتی نشان داده شده است. در جدول (۳-۱) عملکرد چند نمونه میکرو توربین نشان داده شده است.



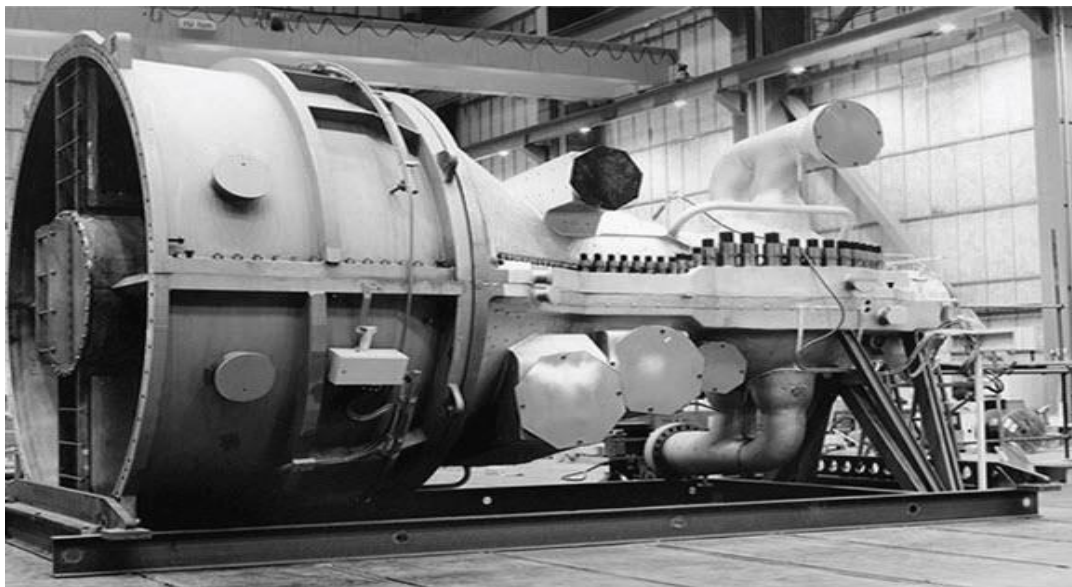
شکل (۷-۱): نمونه‌ای از یک میکرو توربین ۶۰ کیلو واتی [۱۱]

جدول (۳-۱): عملکرد چند نمونه میکرو توربین برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۱۱]

مشخصات و راندمان	واحد	سامانه ۱	سامانه ۲	سامانه ۳
ظرفیت الکتریکی	kW	۳۰	۶۵	۲۵۰
ظرفیت حرارتی	kW	۱۵/۰۷۵	۱۳/۸۹۱	۱۳/۰۸۰
راندمان الکتریکی	%	۲۲/۶	۲۴/۴	۲۶/۰۹
راندمان کل	%	۶۳/۸	۷۱/۲	۶۴

۱-۶-۱ توربین بخار

توربین‌های بخار یکی از متداول‌ترین و قدیمی‌ترین فناوری‌های محرک اولیه بوده و در حال حاضر نیز به طور گسترده‌ای جهت تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. تولید برق توسط توربین‌های بخار از حدود یک صد سال پیش رایج شده و به دلیل بازدهی بیشتر و هزینه‌های کمتر به عنوان جایگزین مناسبی برای ماشین‌های بخار رفت و برگشتی مورد استفاده قرار گرفته است. امروزه در اغلب کشورهای جهان بخش عمده تولید برق توسط توربین‌های بخار صورت می‌پذیرد. ظرفیت توربین‌های بخار تجاری شده در محدوده ۵۰ کیلووات (تولید مقیاس کوچک) تا چند صد مگاوات (تولید نیروگاهی) است. در حال حاضر، در کشورهای مختلف توربین‌های بخار به طور گسترده‌ای به منظور تولید همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. سوخت‌های قابل استفاده در توربین بخار شامل گاز طبیعی، سوخت‌های مایع سبک و سنگین، سوخت‌های جامد مثل انواع زغال‌سنگ، چوب و ... است [۷]. در شکل (۸-۱) نمونه‌ای از یک توربین بخار نشان داده شده است.



شکل (۸-۱): توربین بخار [۷]

در جدول (۴-۱) عملکرد توربین بخار با ظرفیت‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول (۱-۴): عملکرد توربین بخار با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۷]

مشخصات و راندمان	واحد	توربین ۱	توربین ۲	توربین ۳
ظرفیت الکتریکی	kW	۵۰۰	۳۰۰۰	۱۵۰۰۰
راندمان حرارتی توربین	%	۵۰	۷۰	۸۰
راندمان بویلر	%	۸۰	۸۰	۸۰
راندمان الکتریکی	%	۶/۴	۶/۹	۹/۳
راندمان کل سیستم	%	۷۹/۶	۷۹/۵	۷۹/۷

۱-۶-۱-۵ پیل سوختی

پیل سوختی فرآیند تولید الکتریسیته کاملاً متفاوتی با سایر روش‌ها و فناوری‌های محرک‌های اولیه دارد. پیل‌های سوختی همانند باتری‌ها از طریق یک یا چند فرآیند الکتروشیمیایی، الکتریسیته جریان مستقیم تولید می‌نمایند. البته توان الکتریکی باتری‌ها میزان محدودی داشته و با توجه به انرژی ذخیره شده تحویل می‌گردد، اما پیل‌های سوختی تا زمانی که سوخت اولیه به آن‌ها برسد به طور نامحدود می‌توانند تحت بهره‌برداری قرار داشته باشند. یکی از ویژگی‌های پیل سوختی آن است که برخلاف بسیاری از محرک‌های اولیه، تولید الکتریسیته از منبع انرژی توسط پیل سوختی بدون نیاز به فرآیند احتراق صورت می‌پذیرد. تولید الکتریسیته و گرما در پیل سوختی با استفاده از دو الکتروود (آند و کاتد) که یون‌های شارژ شده را از یک الکتروولت عبور می‌دهند صورت می‌پذیرد. این فرآیند با به‌کارگیری یک کاتالیست تسریع می‌گردد. پیل‌های سوختی یکی از فناوری‌های تولید برق با بازدهی مناسب، تمیز و بدون سر و صدا است. از آنجایی که سوخت مورد استفاده توسط پیل سوختی در یک فعل‌وانفعال الکتروشیمیایی مصرف گردیده و سوزانده نمی‌شود، لذا استفاده از سوخت موجب آلاینده‌گی هوا نمی‌شود. توسعه پیل‌های سوختی به عنوان یکی از گزینه‌های تولید برق برای آینده حدوداً از چهل سال پیش شروع شده است؛ اما این فناوری به دلایلی مثل گرانی، پیچیدگی، ظرفیت کم و قابلیت اطمینان اثبات نشده هنوز نتوانسته است بازار تجاری عمده‌ای را به خود اختصاص دهد. البته مزایای پیل‌های سوختی از جمله منافع زیست‌محیطی، بازدهی بالا به گونه‌ای است که در برخی از

کشورها این نوع فناوری مورد حمایت و تشویق دولت‌ها قرار گرفته است. پیل‌های سوختی در ۵ نوع مختلف به شرح ذیل توسعه یافته‌اند:

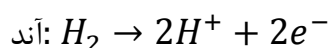
۱-۶-۱-۵-۱ پیل سوختی پلیمری

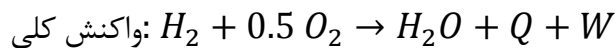
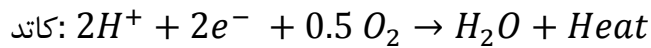
پیل‌های سوختی غشاء پروتون دارای غشاء پلیمری جامد هستند که در حال حاضر عمدتاً غشاء Nafion در این پیل سوختی بکار برده می‌شود و به شکل یک ورقه باریک منعطف است. این غشاء کوچک و سبک بوده و در دمای پایین کار می‌کند (دمای کارکرد بهینه در حدود ۸۵ درجه سانتیگراد است).

برای سرعت بخشیدن به واکنش، یک کاتالیست پلاتینی در دو سطح غشاء الکترولیت استفاده می‌شود که این کاتالیست موجب افزایش قیمت پیل سوختی می‌شود؛ اما بدلیل جامد بودن الکترولیت پیل سوختی و همچنین انعطاف پذیر بودن این الکترولیت، امکان شکستن یا ترک خوردن در آن کم است و این مشخصه، پیل سوختی PEM را برای کاربردهای خانگی و کاربردهای حمل و نقلی مناسب می‌کند.

در پیل سوختی نوع PEM اتم‌های هیدروژن در آند یونیزه می‌شوند و الکترون‌های آن‌ها جدا می‌شود. یون‌های هیدروژن که شامل بار مثبت هستند، به سطح غشاء متخلخل نفوذ می‌کنند و بسمت کاتد می‌روند؛ الکترون‌های جدا شده نمی‌توانند از این غشاء عبور کنند و از یک مدار خارجی عبور می‌کنند و موجب تولید برق می‌شوند. در کاتد الکترون‌ها، 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 شود تا احتمال بوجود آمدن CO و در نتیجه مسمومیت کاتالیست را کاهش دهد [۱۲].

واکنش‌های انجام شده در آند و کاتد بشرح ذیل است [۱۳]:





مزایا [۱۲]:

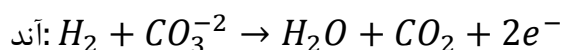
- دمای پایین و شروع بکار سریع
- عدم حساسیت به دی اکسیدکربن
- امکان استفاده از گازهای مشتق از هیدروکربن بعنوان سوخت

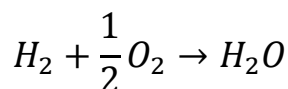
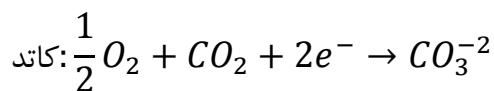
معایب

- حساسیت به مونواکسید کربن تولیدی در ریفورمرها
- بکارگیری فلزات کمیاب در ساختمان پیل
- پیچیده بودن سیستم مدیریت آب در مجموعه غشاء و الکتروود

۱-۶-۱-۵-۲ نوع کربنات مذاب (MCFC):

در پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) الکتروولیت ترکیب ۳۲٪ درصد کربنات پتاسیم و ۶۸٪ درصد کربنات لیتیم می‌باشد. الکتروود کاتد آن از جنس اکسید نیکل لیتیمی شده و الکتروود آند 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 به شمار می‌آید. در آند، هیدروژن با این یون‌ها واکنش می‌دهد و دی اکسیدکربن، آب و الکترون تشکیل می‌دهد. الکترون‌ها توسط یک مدار خارجی از آند به کاتد منتقل می‌شود و برق تولید می‌کند. اکسیژن هوا، دی اکسیدکربن بازیافت شده از آند با الکترون‌ها واکنش داده و یونهای کربنات را بوجود می‌آورد و الکتروولیت را سرشار از یونهای کربنات می‌کند [۱۳].





مزایا [۱۲]:

- امکان بکارگیری در مولدهای دو منظوره
- عدم استفاده از کاتالیست گران قیمت
- راندمان بالا

معایب [۱۲]:

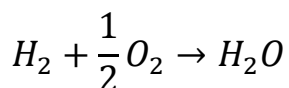
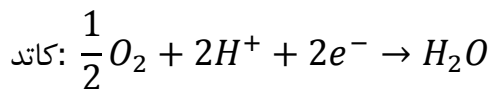
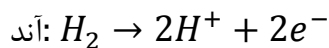
- حساسیت زیاد به سولفور
- حل شدن اکسید نیکل
- احتیاج به چرخه دی اکسید کربن

پیل‌های سوختی کربنات مذاب، (MCFC) دما بالا می‌توانند هیدروژن را از سوخت‌های مختلف توسط رفورمر داخلی یا خارجی استخراج کنند؛ به‌علاوه حساسیت کمتری نسبت به مسمومیت مونوکسید کربن دارند. پیل‌های سوختی کربنات مذاب با کاتالیست‌های نیکلی بسیار خوب کار می‌کنند و کاتالیست‌های نیکلی ارزان‌تر از پلوتینم هستند. پیل‌های سوختی کربنات مذاب در مقایسه با پیل‌های سوختی اکسید جامد دارای دو مشکل است؛ یکی از این مشکلات پیچیدگی کار با الکترولیت مایع است و دومین مشکل، باقی‌مانده‌های واکنش شیمیایی در پیل سوختی کربنات مذاب است. یون‌های کربنات الکترولیت در واکنش‌های آند استفاده می‌شوند؛ بنابراین نیاز است که توسط تزریق دی اکسید کربن در کاتد، این مقدار جبران شود. از گرمای خروجی پیل سوختی نیز می‌توان برای کارهای صنعتی استفاده نمود [۱۲].

۱-۶-۱-۳-۵ نوع فسفریک اسید (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 الک ترودهای پیلهای سوختی اسید فسفریک از جنس پلاتین می باشد که بر روی سطح پودر کربن فعال نشانداده 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 می کنند و برق تولید می کنند و به کاتد برمی گردند. واکنشهای انجام شده در این پیل عبارتست از [۱۳]:



مزایا [۱۲]:

- 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 [۱۲]:

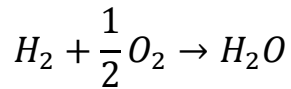
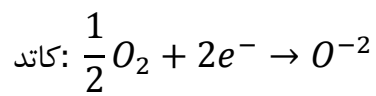
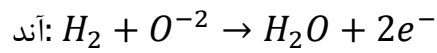
- کم بودن سرعت احیاء اکسیژن

• حساسیت به H_2S

در کاتد الکترون‌ها، یون‌های هیدروژن و اکسیژن آب بوجود می‌آورند که با فشار به بیرون پیل سوختی هدایت می‌شود. با وجود کاتالیست پلوتنیم سرعت واکنش‌ها بالا می‌رود. از مزایای پیل سوختی اسید فسفریک می‌توان به توان تحمل پیل سوختی در قبال میزان کمی از مونوکسید کربن و همین‌طور توانایی تحمل دمای بالای اشاره کرد. این پیل سوختی اجزایی با مقاومت بالا باید داشته باشد تا در مقابل خوردگی اسید مقاومت کند. هیدروژن مورد نیاز برای PAFC می‌تواند توسط یک ریفورمر خارجی، از یک سوخت هیدروکربنی بوجود بیاید در صورتی که سوخت مورد نظر گازوئیل باشد، سولفور آن باید جدا شود. زیرا سولفور به کاتالیست الکترودها صدمه می‌زند. همچنین می‌توان از گرمای بوجود آمده در PAFC ها در کاربرد ترکیبی گرما و برق استفاده کرد [۱۲].

۱-۶-۱-۵-۴ نوع اکسید جامد (SOFC):

پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) از یک الکتrolیت سرامیکی بجای یک الکتrolیت مایع استفاده می‌کند. الکتrod آند ملغمه ای از نیکل و زیرکینیا و الکتrod کاتد از جنس منگنیت لانتانیم است. درجه حرارت کارکرد پیل ۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. الکتrolیت جامد با الکتroدها که از مواد متخلخل مخصوصی تشکیل شده اند، پوشانده شده است. در دمای بالای عملکرد پیل سوختی SOFC، یون‌های اکسیژن با بارمنفی از شبکه کریستالی عبور می‌کنند. وقتی یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آند عبور کند، یک جریان شارژ شده منفی شامل یون‌های اکسیژن از الکتrolیت عبور می‌کنند تا سوخت را اکسید کنند. اکسیژن ذخیره شده در کاتد معمولاً از هوا گرفته می‌شود. الکترون‌های ایجاد شده در آند از یک بار خارجی (مدار خارجی) عبور کرده و به کاتد می‌رود. با این کار یک مدار الکتریکی کامل می‌شود و انرژی برق تولید می‌شود. پیل‌های سوختی نوع اکسید جامد SOFC نیاز به رفرورمر خارجی ندارند و واکنش‌های انجام شده در آند و کاتد بصورت زیر می‌باشد [۱۳]:



مزایا [۱۲]:

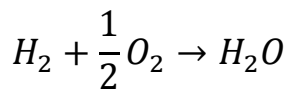
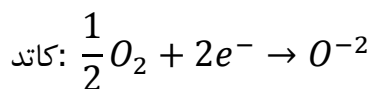
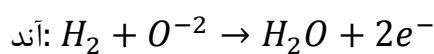
- عدم حساسیت به مونواکسیدکربن
- قابلیت مصرف سوخت‌های گوناگون
- عدم نیاز به هیدروژن خالص
- بالا بودن راندمان سیستم
- عدم نیاز به سوخت مجزا
- امکان استفاده مستقیم از گاز طبیعی بعنوان سوخت
- قابل استفاده در مولدهای دو منظوره
- عدم استفاده از الکترولیت مایع
- عدم استفاده از فلزات گران قیمت و کمیاب در ساخت

معایب [۱۲]:

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

۱-۶-۱-۵-۵ نوع آلکالاین (AFC)

پیل‌های سوختی قلبی با هیدروژن و اکسیژن خالص کار می‌کنند و از محلول هیدروکسید پتاسیم در آب بعنوان الکترولیت استفاده می‌کنند و الکترود آند آن از جنس نیکل و الکترود کاتد آن از جنس اکسید نیکل لیتیومی ساخته می‌شود. درجه حرارت کارکرد این پیل پایین بوده و بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد [۱۲].



در این نوع از پیل‌های سوختی یون‌های هیدروکسیل $-OH$ از سمت کاتد به آند رفته و در آند گاز هیدروژن با یون‌های هیدروکسیل واکنش داده و آب و الکترون را ایجاد می‌کنند. الکترون‌های بوجود آمده در آند توسط یک مدار خارجی، توان الکتریکی تولید می‌کنند و از طریق این مدار خارجی، الکترون‌ها به کاتد باز می‌گردند. الکترون‌ها در کاتد با اکسیژن و آب واکنش می‌دهند و موجب تشکیل یون‌های هیدروکسیل بیشتری می‌شوند. این یون‌ها درون الکترولیت نفوذ کرده و واکنش‌ها ادامه پیدا می‌کنند.

مزایا [۱۲]:

- عدم نیاز به فلزات کمیاب
- بالا بودن راندمان

معایب [۱۲]:

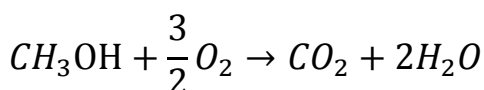
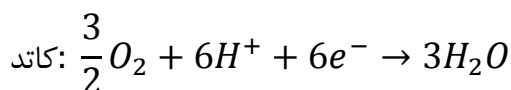
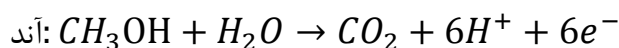
• حساسیت شدید به دی اکسید کربن

• لزوم استفاده از هیدروژن خالص

پیل‌های سوختی قلیایی از میزان آلودگی کمی برخوردار هستند و بخاطر احتمال واکنش‌های ناخواسته در این پیل نیاز به هیدروژن خالص شده وجود دارد و در صورتی که هیدروژن خالص نباشد موجب واکنش‌های شیمیایی اضافی و ایجاد کربنات جامد می‌شود که این ماده در واکنش‌های پیل سوختی اختلال ایجاد می‌کند. مشکل دیگر پیل سوختی قلیایی میزان زیاد پلاتین است که بعنوان کاتالیست از آن استفاده می‌شود. این کاتالیست قیمت زیادی دارد و پیل سوختی قلیایی را برای کاربردهای عادی نامناسب می‌کند و از آنجایی که احتمال نشت الکتrolیت مایع نیز ممکن است؛ بنابراین این نوع از پیل‌های سوختی برای کاربردهای حمل و نقلی مناسب نیستند [۱۲].

۱-۶-۱-۵-۶ پیل سوختی متانولی مستقیم (DMFC):

پیل سوختی متانولی در حقیقت یک پیل سوختی پلیمری است که قادر است متانول مایع را مستقیماً بعنوان سوخت مصرف کند؛ از اینرو الکتrolیت آن مانند پیل سوختی پلیمری عمدتاً از جنس نافیون^۱ می‌باشد. الکتroد آند از جنس آلیاژ پلاتین روتینیوم (Pt-Ru) و الکتroد کاتد آن از جنس پلاتین است. این نوع از پیل‌های سوختی در محدوده وسیعی از درجه حرارت کار می‌کنند و دمای کارکرد آن بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد است. واکنش‌های انجام شده در الکتroدهای این پیل‌های سوختی عبارتند از [۱۲]:



^۱.Nafion

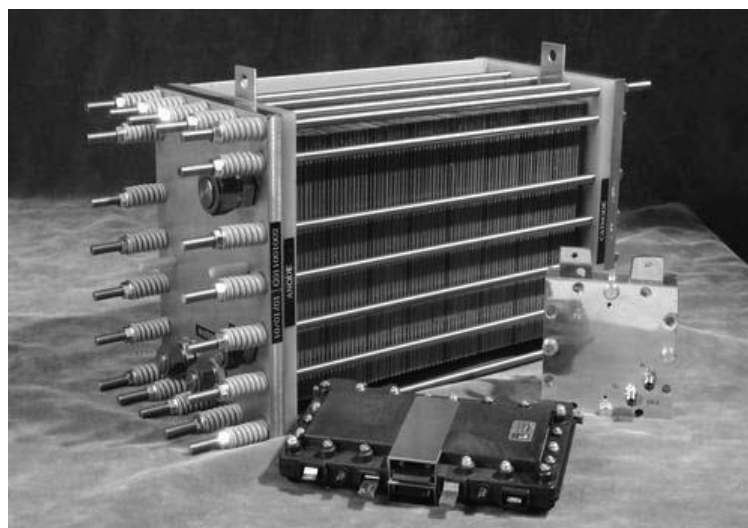
مزایا [۱۲]:

- 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 [۱۲]:

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

در هر یک از انواع پیل‌های سوختی فوق‌الذکر نوع الکترولیت و دمای بهره‌برداری متفاوت است. هر یک از انواع پیل‌های سوختی دارای عملکرد، مشخصات، مزایا و محدودیت‌های خاص خود بوده و بنابراین در شرایط متفاوتی برای کاربردهای تولید پراکنده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴]. در شکل (۱-۹) نمونه‌ای از یک پیل سوختی با ظرفیت ۵ کیلووات نشان داده شده است.



شکل (۹-۱): پیل سوختی با ظرفیت ۵ کیلووات [۱۴]

در جدول (۵-۱) مشخصات انواع پیل‌های سوختی نشان داده شده است.

جدول (۵-۱): مشخصات انواع پیل سوختی [۱۴]

مشخصات	واحد	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
نوع سازه	-	پلاستیک، فلز و یا کربن	کربن، سرامیک فسفری	فلزات دمای زیاد، سرامیک فسفری	سرامیک، فلزات دمای زیاد
دمای بهره‌برداری	°C	۸۵-۶۵	۲۱۰-۱۹۰	۷۰۰-۶۵۰	۱۰۰۰-۷۵۰
راندمان الکتریکی	(%)	۳۲	۳۷	۴۴	۵۸

۶-۱-۶-۱ موتورهای استرلینگ

موتور استرلینگ اولین بار توسط روبرت استرلینگ^۱ در سال ۱۸۱۶ ثبت اختراع شد. کاربرد اولیه این محرکه، پمپاژ آب برای بهره‌برداری از معادن بود. از دیگر کاربردهای این نوع موتور استفاده در صفحات متمرکز کننده انرژی خورشیدی، محرکه زیردریایی‌ها و تولید پراکنده برق و گرما است. موتورهای استرلینگ بر اساس چرخه کارنو^۲ کار می‌کنند. از نظر تئوری، چرخه کارنو پربازده‌ترین

^۱ Robert Stirling

^۲ Carnot Cycle

چرخه برای یک موتور حرارتی است. در عمل، میزان بازدهی موتورهای استرلینگ در حدود بازدهی میکرو توربین‌ها و مقداری کمتر از موتورهای رفت و برگشتی است. از طریق بازیافت انرژی گرمایی سامانه خنک‌کن موتور و سیستم روغن‌کاری و نیز گازهای داغ خروجی می‌توان به میزان بازدهی کلی در حدود ۸۰٪ دست یافت. این میزان بازدهی، موتورهای استرلینگ را برای کاربردهای سیستم تولید همزمان در ساختمان‌های مسکونی، تجاری و نیز صنایع کوچک موجه می‌نماید. در حال حاضر این نوع موتورها در محدوده ظرفیت ۱ تا ۵۵ کیلووات در حال توسعه می‌باشند. با به‌کارگیری چندین واحد به صورت موازی می‌توان به ظرفیت‌های بالاتری دست یافت. موتور استرلینگ از یک محفظه احتراق مجزا استفاده می‌نماید که با طراحی مناسب آن می‌توان میزان آلاینده را کاهش داده و نیز می‌توان از سوخت‌های مختلفی مثل گاز طبیعی، پروپان، نفت، زیست توده و سایر سوخت‌های ائتلافی هم استفاده نمود [۹].

در شکل (۱-۱۰) نمونه‌ای از یک موتور استرلینگ با ظرفیت ۳۵ کیلووات نشان داده شده است. با وجود مناسب بودن این نوع محرکه اولیه برای کاربردهای تولید پراکنده، تاکنون موفقیت تجاری قابل توجهی برای موتورهای استرلینگ کسب نشده است. در جدول (۱-۶) مشخصات عملکرد موتور



شکل (۱-۱۰): موتور استرلینگ ۳۵ کیلوواتی [۹]

استرلینگ ۵۵ کیلوواتی نشان داده شده است. در جدول (۱-۷) نیز مزایا، معایب و ظرفیت محرکه‌های اولیه بیان شده است.

جدول (۱-۶): مشخصات عملکرد موتور استرلینگ ۵۵ کیلوواتی برای کاربردهای CHP و به تنهایی [۹]

مشخصات عملکرد	واحد	موتور استرلینگ STM4-260
ظرفیت الکتریکی	kW	۵۵
ظرفیت حرارتی	kW	۵۴۵۳
راندمان الکتریکی	%	۳۰/۶
راندمان کل سیستم	%	۸۱/۷

جدول (۱-۷): مزایا، معایب و ظرفیت محرکه‌های اولیه [۱۵]

نوع فناوری	مزایا	معایب	ظرفیت
موتورهای رفت و برگشتی	بازدهی بالا همراه با قابلیت بهره‌برداری در بار جزئی	هزینه تعمیرات زیاد کاربردهای CHP محدود به دمای کم	کمتر از ۵ مگاوات
نوع جرقه‌ای	راه‌اندازی سریع سرمایه‌گذاری نسبتاً کم	آلاینده‌گی نسبتاً زیاد هوا نیاز به خنک‌سازی	
نوع تراکمی	امکان اجرای تعمیرات اساسی با استفاده از کارکنان محلی امکان بهره‌برداری از سوخت گاز با فشار کم	نویزهای فرکانس پایین به میزان زیاد	با سرعت زیاد: کمتر از ۴ مگاوات با سرعت کم: بین ۴ الی ۷۵ مگاوات
توربین گاز	قابلیت اطمینان بالا آلاینده‌گی کم گرمای قابل دسترس باکیفیت بالا عدم نیاز به خنک‌سازی	نیاز به سوخت گاز با فشار قوی بازدهی کم در بار پایین کاهش بازدهی در صورت افزایش دمای محیط	۵۰۰ کیلووات الی ۲۵۰ مگاوات
توربین بخار	قابلیت اطمینان بالا بازدهی کلی بالا استفاده از انواع سوخت طول عمر زیاد قابلیت تغییر نسبت تولید برق به گرما	راه‌اندازی کند کم بودن نسبت تولید برق به گرما	۵۰ کیلووات الی ۲۵۰ مگاوات
میکرو توربین	قسمت‌های متحرک کم ابعاد کوچک و وزن سبک، آلاینده‌گی کم عدم نیاز به خنک‌سازی	هزینه بالا بازدهی مکانیکی نسبتاً کم کاربردهای CHP محدود به دمای کم	۳۰ الی ۲۵۰ کیلووات
پیل سوختی	آلاینده‌گی کم سروصدای کم بازدهی بالا در بارهای مختلف	هزینه بالا نیاز به فرآوری سوخت	۵ کیلووات الی ۲ مگاوات

در جدول (۱-۸) ویژگی‌های محرک‌های اولیه با هم مقایسه شده است.

جدول (۱-۸): مقایسه ویژگی‌های محرکه‌های اولیه [۱۶]

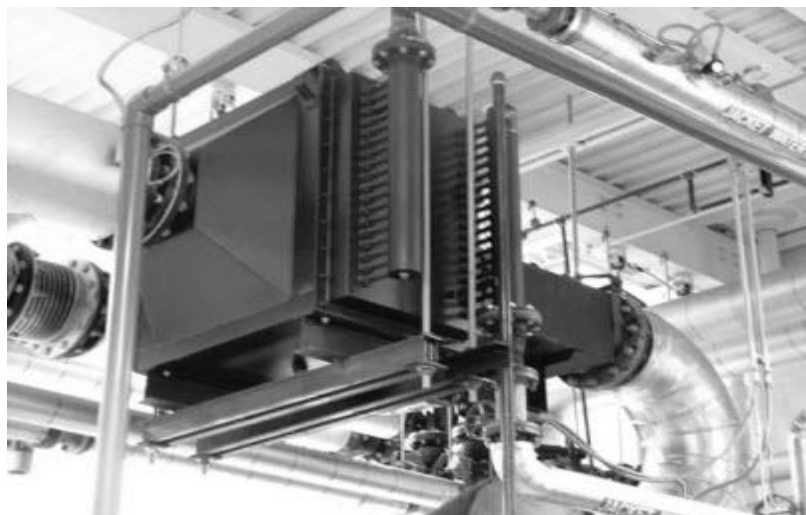
مشخصات	موتور رفت و برگشتی	توربین گاز	توربین بخار	میکرو توربین	پیل سوختی
بازدهی الکتریکی	۲۲ - ۴۰٪	۲۲ - ۳۶٪	۱۵ - ۳۸٪	۱۸ - ۲۷٪	۳۰ - ۶۳٪
بازدهی کلی	۷۰ - ۸۰٪	۵۰ - ۷۰٪	۸۰٪	۶۵ - ۷۵٪	۵۵ - ۸۰٪
زمان راه‌اندازی	۱۰ ثانیه	۱۰ دقیقه تا ۱ ساعت	۱ ساعت تا ۱ روز	۶۰ ثانیه	۳ ساعت تا ۲ روز
انواع سوخت	گاز طبیعی، بیوگاز، پروپان، گازوئیل	گاز طبیعی، بیوگاز، پروپان، گازوئیل	تمامی سوخت‌ها	گاز طبیعی، بیوگاز، پروپان، گازوئیل	هیدروژن گاز طبیعی، پروپان، متانول
سر و صدا	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	کم
کاربردهای گرمای خروجی	آب گرم، بخار فشار پایین	گرمایش فرآیند، آب گرم، بخار فشار پایین و بالا	بخار فشار پایین و بالا	گرمایش فرآیند، آب گرم، بخار فشار پایین	آب گرم، بخار فشار پایین و بالا

۱-۶-۱-۷ تجهیزات الکتریکی

تجهیزات الکتریکی برای سیستم‌های تولید همزمان شامل ژنراتورها، ترانسفورمرها، تجهیزات سوئیچینگ، مدار شکن‌ها، رله‌ها، کنتورها، کنترل‌ها، خطوط انتقال و دیگر تجهیزات وابسته است. علاوه بر تجهیزاتی که در تولید توان الکتریکی مورد نیاز است، سیستم‌های تولید همزمان ممکن است برای بهره‌برداری اضطراری و نیز فروش برق به شبکه نیاز به تجهیزاتی برای اتصال به شبکه برق داشته باشند [۹].

۱-۶-۱-۸ دستگاه‌های بازیافت حرارت

بازیافت حرارتی معمولاً توسط مبدل‌های خاص حرارتی صورت می‌گیرد. از جمله این مبدل‌ها، مولد بخار بازیافت حرارت (HRSG) و یا مبدل‌هایی همانند رادیاتور موتورهای احتراقی می‌باشند. شکل (۱-۱۱) نمونه‌ای از یک مبدل حرارتی سیستم تولید همزمان را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱-۱): نمونه یک مبدل سیستم تولید همزمان [۹]

در اکثر این تجهیزات، گاز خروجی از دستگاه عبور کرده و از بالای دستگاه خارج می‌شود. انرژی گاز خروجی برای گرم کردن و تبخیر آب و سوپرهیت کردن بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد. اختلاف حرارت بین گاز خروجی و آب موقعی که شروع به تبخیر می‌نماید، به عنوان نقطه پینچ اختلاف درجه حرارت می‌نامند. این نقطه دارای کمترین اختلاف درجه حرارت بوده و عملکرد کلی وسیله بازیابی حرارت را محدود می‌کند. از آنجایی که میزان انتقال حرارت متناسب با اختلاف درجه حرارت است، هر قدر که مقدار این اختلاف بیشتر باشد، میزان انتقال حرارت بزرگ‌تر است. از طرف دیگر با افزایش اختلاف درجه حرارت، بایستی از میزان جریان بخار کاسته شده و از انرژی گاز خروجی کمتری استفاده شود. برای استفاده از اختلاف درجه حرارت‌های کوچک‌تر و تثبیت میزان انتقال حرارت بالاتر، سطوح انتقال حرارت بزرگ‌تری مورد نیاز است. سطوح انتقال حرارت بزرگ‌تر طبعاً به سرمایه‌گذاری‌های بیشتری نیاز دارد. نتیجه اینکه برای استفاده از یک وسیله بازیابی حرارت در طراحی سیستم تولید همزمان باید بین دو گزینه فوق حالت تعادل را به دست آورد.

۱-۶-۱-۹ چیلر جذبی

چیلرهای جذبی از انرژی حرارتی موجود در سیستم‌های تولید همزمان، سرمایه‌گذاری تولید می‌کنند. در چیلرهای جذبی از سیالات و سیکل ترمودینامیکی مشخصی استفاده می‌شود که درجه حرارت‌های

پایین را بدون نیاز به یک کمپرسور بخار ایجاد می‌کنند. یک چیلر جذبی بجای استفاده از کمپرسور بخار از پمپ‌های مایع و منابع با درجه حرارت پایین مثل آب گرم، بخار یا گاز دودکش استفاده می‌کند. در چیلرهای جذبی از سیالات محلولی استفاده می‌شود که از دو جزء تشکیل شده‌اند. اصول کلی عملکرد چیلر جذبی بر این اساس است که بعد از پمپ شدن محلول به فشار بالا، از انرژی با درجه حرارت پایین برای تبخیر یک جزء محلول استفاده می‌شود. از این جزء به عنوان مبرد در سیکل استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از محلول‌ها به شرح زیر است:

- آب و آمونیاک
- لیتیوم بروماید و آب
- لیتیوم کلراید و آب

در مورد اول آمونیاک به عنوان مبرد بوده و در دو مورد دیگر آب به عنوان مبرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کاربردهای تولید همزمان ویژگی مهم چیلرهای جذبی این است که آن‌ها از انرژی درجه حرارت نسبتاً پایین که به طور مستقیم و یا غیرمستقیم از محرک اولیه به دست می‌آید، می‌توانند برای تولید آب سرد در سرمایش استفاده کنند. خروجی حرارتی یک سیستم تولید همزمان را می‌توان برای گرمایش در خلال فصل سرد سال و با استفاده از چیلر جذبی برای سرمایش در خلال فصل گرم سال استفاده کرد. در آب و هوای گرم چیلرهای جذبی یک جزء مهم از جهت تکنیکی و اقتصادی در موفقیت سیستم‌های تولید همزمان است [۹].

۷-۱ جمع‌بندی

در قسمت‌های پیشین ابتدا در مورد افزایش تقاضا برای انرژی، افزایش هزینه‌های تولید انرژی و افزایش نگرانی‌های زیست محیطی سخن گفته شد. در ادامه سیستم‌های تولید همزمان معرفی شده و با سیستم‌های سنتی تولید انرژی مقایسه گردید. سپس مزایای سیستم‌های تولید همزمان شمرده

شده و اجزای آن ذکر گردید. در فصل بعد بخشی از کارهای پیشین در زمینه‌های سیستم‌های تولید همزمان بر اساس محرک‌های اولیه‌ی پیل سوختی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در ادامه این فصل سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه‌ی پیل سوختی با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرند. در فصل دوم کارهای پیشین مرور خواهد شد و در فصل سوم، مدل‌سازی و روابط حاکم بر سیکل بیان می‌گردد. در فصل چهارم مطالعه‌ی صورت گرفته تشریح و در فصل پنجم نیز نتایج آورده شده است.

فصل دوم

مروری بر کارهای پیشین

۱-۲ مقدمه

در این فصل در ابتدا، بخشی از تحقیقات انجام شده در زمینه سیستم‌های تولید همزمان بررسی شده است. سپس قسمتی از نتایج مطالعات صورت گرفته در زمینه استفاده از پیل‌های سوختی برای کاربردهای سیستم‌های تولید همزمان ارائه شده است و در پایان کار بررسی شده در این تحقیق معرفی شده است.

۲-۲ مروری بر تعدادی از کارهای انجام شده در زمینه CCHP

مرور بر سیستم‌های تولید همزمان را می‌توان بر اساس نوع محرک‌های اولیه، نوع سیستم‌های خنک‌کننده، نوع کاربرد، نوع سوخت و نوع آنالیز انجام شده طبقه‌بندی کرد. آنچه که به طور عمده باعث تمایز بین سیستم‌های تولید همزمان می‌شود، نوع محرک اولیه آن‌ها است. در سیستم‌های تولید همزمان، محرک اولیه به مانند قلب نیروگاه است و در نتیجه انتخاب مناسب آن برای موفقیت آمیز بودن عملکرد سیستم بسیار با اهمیت است؛ بنابراین در این قسمت، تحقیقات با تمرکز بر محرک اولیه‌ی سیستم‌های تولید همزمان، بررسی شده است. در ابتدا بر اساس تجهیزات به کار رفته، نوع آنالیز صورت گرفته و بهینه‌سازی انجام شده صرف نظر از نوع محرک اولیه کارهای انجام شده، ارائه شده است. سپس با مشخص کردن نوع محرک اولیه، پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲ تحقیقات پیشین صرف نظر از نوع محرک اولیه

وو و ونگ^۱ [۱۷] وضعیت توسعه سیستم‌های CCHP را مورد بررسی قرار دادند. چهار نمونه سیستم CCHP با فن‌آوری‌های موجود برای ظرفیت‌های مختلف را بررسی کردند. آن‌ها برخی از محرک‌های اصلی و فن‌آوری‌های فعال حرارتی را نیز به طور خلاصه معرفی کردند. آن‌ها نشان دادند که راندمان سیستم CCHP می‌تواند به اندازه ۷۰ تا ۹۰٪ باشد. این مقدار به طور قابل توجهی بالاتر از راندمان سیستم‌های مستقل متداول تأمین انرژی است.

¹ Wu and Wang

سیستم CCHP دارای ساختار پیچیده و جریان‌های متنوع انرژی است. بخاطر همین، نحوه مدیریت یک کلید اساسی و مهم برای افزایش بهره‌وری این سیستم‌ها است. این موضوع در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

کاردنا^۱ و همکاران [۱۹ و ۱۸] یک استراتژی مدیریت بهینه سیستم تولید همزمان با در نظر گرفتن ویژگی‌های فنی اجزا معرفی کردند. این سیستم بر اساس مدیریت تقاضای حرارتی^۲ و مدیریت تقاضای برق^۳ است.

در مطالعه‌ای دیگر ماگو و چامرا^۴ [۲۰] ارزیابی و بهینه‌سازی سیستم CCHP را با الویت بار حرارتی (FTL)^۵ و الویت بار الکتریکی (FEL)^۶ بر پایه مصرف انرژی اولیه، هزینه‌های عملیاتی و تولید گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن انجام دادند. علاوه بر این، این مقاله شامل آنالیز و ارزیابی استراتژی عملیات بهینه‌سازی است. سیستم CCHP در طول فعالیت خود زیر بار ترکیبی برق و حرارت قرار دارد. آن‌ها متوجه شدند که با الویت بار حرارتی انرژی اولیه مطلوب به میزان ۷/۵ درصد و هزینه‌ها به میزان ۴/۴ درصد کاهش می‌یابد. در زمان الویت بار الکتریکی انتشار گاز دی‌اکسیدکربن به میزان ۱۴/۸ درصد کاهش می‌یابد. کاردونا و پیاسنتینو^۷ [۲۲ و ۲۱] نیز سیستم‌های CHP را با الویت بار حرارتی و الویت بار الکتریکی مدل کردند. انتخاب بین این دو استراتژی بستگی به ظرفیت محرک اولیه و شرایط دیگر مثل امکان فروش برق به شبکه و یا ذخیره‌سازی آن برای مصارف بعدی دارد. فومو^۸ و همکاران [۲۳] یک سیستم CCHP که شامل چیلر جذبی و سیستم فشرده سازی بخار است را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تاثیر ظرفیت مکانیزم خنک کننده و ظرفیت واحد تولید برق را بر راندمان بررسی کردند. همچنین استراتژی الویت بار الکتریکی را نیز بررسی کردند.

¹ Cardona

² Thermal Demand Management

³ Electric Demand Management

⁴ Mago and Chamra

⁵ Following the Thermal Load

⁶ Following the Electric Load

⁷ Cardona and Piacentino

⁸ Fomu

نسبت برق خروجی به انرژی حرارتی خروجی، یک فاکتور موثر برای عملکرد سیستم CCHP و حالت-های عامل آن است. اگر نسبت برق خروجی به انرژی حرارتی خروجی مقداری ثابت باشد، حالت عامل سیستم CCHP اهمیت چندانی ندارد. اگر انرژی مورد نیاز مصرف کننده طوری مدیریت شود که متناسب با نسبت برق خروجی به انرژی حرارتی خروجی از سیستم باشد، آنگاه راندمان سیستم می-تواند به ماکزیمم مقدار خود برسد [۲۴]. متأسفانه این اتفاق به ندرت رخ می‌دهد، زیرا که مقدار انرژی مورد نیاز مصرف کننده ثابت نیست و دارای نوسانات زیادی در طول روز و در فصل‌های مختلف سال است. به خاطر وجود حالت‌های عامل مختلف، انرژی حرارتی و یا برق تولیدی ممکن است کمتر یا بیشتر از مورد نیاز باشد.

در شرایط کمبود عرضه، با استفاده از سوخت بیشتر تولید انرژی افزایش می‌یابد. برای زمانی که میزان عرضه بیشتر از تقاضای مصرف کننده باشد، راه حل‌های وجود دارد. به طور خاص برای مدیریت برق مازاد دو روش وجود دارد. روش اول، فروش برق به شبکه و یا تبدیل آن به انرژی حرارتی است. فروش برق بستگی به قوانین بازار برق و تبدیل آن به انرژی حرارتی نیاز به نصب موتور حرارتی دارد. روش دوم، استفاده از چیلر برقی به عنوان یک وسیله کارآمد برای تولید سرمایش است. در این تحقیق نیز سیستم تولید همزمان علاوه بر چیلر جذبی، دارای چیلر الکتریکی نیز است.

کاردنا و پیاسنتینو^۱ [۲۵] یک طرح و روش مفهومی را بر اساس ترموآکونومیک ارائه کردند. آن‌ها این روش را با هدف طراحی و بهینه‌سازی یک سیستم CCHP که در آن از یک سیستم خنک کننده ترکیبی برای برطرف کردن نیاز کاربران استفاده می‌شود ارائه کردند.

به طور مشابه، برای استفاده کامل از انرژی حرارتی مازاد، دو انتخاب وجود دارد. روش اول، ذخیره آن در واحدهای ذخیره‌سازی حرارتی و روش دوم، تبدیل آن به انرژی برق با استفاده از برخی تجهیزات است. در روش اول ذخیره و یا آزاد شدن انرژی حرارتی بستگی به شرایط دارد. در روش دوم نه تنها از

¹ Cardona and Piacentino

انرژی حرارتی مازاد استفاده مفید می‌شود بلکه نسبت انرژی برق به انرژی حرارتی خروجی از سیستم CCHP تنظیم می‌شود.

کاو و لیو^۱ [۲۶] عملکرد سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش یک ساختمان معمولی را با استفاده از آنالیزهای ترمودینامیکی و ترمواکونومیکی بر پایه شبیه‌سازی عملکرد طراحی و عملکرد بهینه‌سازی سیستم مورد بررسی قرار دادند. در بهینه‌سازی آن‌ها از دو تابع هدف راندمان انرژی و سود ناخالص کل استفاده کردند. نتایج نشان داد که اگر نرخ بار به اندازه کافی بالا باشد استفاده از این سیستم مزایای بسیاری دارد.

لی^۲ و همکاران [۲۷] روشی برای ارزیابی مصرف انرژی اولیه برای CCHP و تولید جداگانه ارائه کردند. علاوه بر این آن‌ها از نرخ صرفه‌جویی انرژی سوخت (FESR)^۳ استفاده و آن را معرفی کردند. آن‌ها دریافتند که سیستم با تولید برق زیاد پتانسیل بیشتری برای صرفه‌جویی انرژی دارد. چو^۴ و همکاران [۳۲] یک الگوریتم انرژی را معرفی کردند که هزینه‌های انرژی را بر اساس محدودیت‌های راندمان انرژی برای هر جز با استفاده از یک مدل جریان شبکه برای یک سیستم CHP معمولی ارائه می‌دهد. الگوریتم سیگنال‌های عملیاتی را برای CHP فراهم می‌کند.

۴-۲ تحقیقات پیشین با توجه به نوع محرک اولیه

در این قسمت پژوهش‌های پیشین بر اساس نوع محرک اولیه ارائه شده است.

۴-۲-۱ موتور احتراق داخلی

مطالعات زیادی بر روی موتور احتراق داخلی به عنوان محرک اولیه سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه صورت گرفت. یک سیستم میکرو CCHP خانگی که شامل یک چیلر جذبی است توسط هانگ فو^۵

¹ Cao and Liu

² Li

³ Fuel Energy Saving Ratio

⁴ Cho

⁵ Huangfu

همکاران [۲۹] مورد بررسی تجربی قرار گرفت. محققان عملکرد چیلر جذبی را تحت شرایط مختلف گرمایشی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که تقریباً یک رابطه خطی بین چیلر جذبی با تغییر دمای آب گرم ورودی وجود دارد.

پس پی سیل^۱ و همکاران [۳۰] سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه و دوگانه^۲ را برای تأمین انرژی یک ساختمان بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که در مقایسه با سیستم تولید جداگانه^۳ برق، گرمایش و سرمایش سیستم تولید همزمان دوگانه به میزان ۳۱٪ و سیستم تولید همزمان سه‌گانه به میزان ۳۹٪ در مصرف انرژی اولیه صرفه جویی می‌کند.

آنالیزهای اقتصادی نیز بر روی سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه موتور احتراق داخلی صورت گرفت. چیکو و مانکارلا^۴ [۳۱] شش طرح مختلف را برای تولید سرمایش با هم مقایسه کردند که یکی از طرح‌ها سیستم تولید همزمان سه‌گانه نیست. آن‌ها اثر نوسانات قیمت برق و گاز را روی زمان بازپرداخت مورد مطالعه قرار دادند. این آنالیز یک تصویر منطقی خوبی برای مقایسه راه‌حل‌های مختلف ارائه کرد.

۲-۴-۲ موتور استرلینگ

کونگ^۵ و همکاران [۳۲] راندمان انرژی و اقتصادی یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه موتور استرلینگ را با یک سیستم تولید جداگانه مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که سیستم CCHP با محرک اولیه موتور استرلینگ در مقایسه با سیستم تولید جداگانه ۳۳٪ از انرژی اولیه را صرفه‌جویی می‌کند. نتایج نشان داد که عملکرد حرارتی چیلر جذبی تأثیر زیادی بر راندمان سیستم CCHP دارد.

¹ Pospisil

² Cogeneration

³ Separated Energy Production

⁴ Chicco and Mancarella

⁵ Kong

۲-۴-۳ توربین بخار

کستا^۱ و همکاران [۳۳] عملکرد اقتصادی سیستم CCHP را آنالیز کردند. آن‌ها تولید همزمان سه‌گانه، دوگانه و پمپ حرارتی جذبی^۲ را با هم مقایسه کردند. پمپ حرارتی جذبی برای این انتخاب شد که بیش‌ترین کاهش مصرف انرژی را صرف نظر از تولید برق بررسی کنند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سیستم تولید همزمان سه‌گانه دارای بیش‌ترین بهره‌وری است. به هر حال سیستم تولید دوگانه سرمایه‌ش تولید نمی‌کند و پمپ حرارتی جذبی نیز برق تولید نمی‌کند بنابراین این نتیجه‌گیری نمی‌تواند دقیق باشد.

پردس^۳ و همکاران [۳۴] آنالیز راندمان انرژی و انرژی چیلرهای خنک‌کننده برای سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه توربین بخار را انجام دادند. در این مقاله پنج سیستم سرمایه‌شی مختلف که چهارتا از آن‌ها چیلرهای جذبی متفاوت و آخری کمپرسور الکتریکی^۴ است، باهم مقایسه شدند. نتایج آنالیز نشان داد که راندمان چیلرهای جذبی زمانی که در سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه فعالیت می‌کنند به مراتب بیشتر از راندمان این چیلرها زمانی که به طور مجزا فعالیت می‌کنند است.

۲-۴-۴ توربین گاز

مطالعات متفاوتی بر روی سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه توربین گاز صورت گرفته است. برخی از مطالعات تنها بر اساس آنالیز انرژی بوده است. کالوا^۵ و همکاران [۳۵] برای ارزیابی سیستم‌های توربین گازی مختلف یک مدل ساده را توسعه دادند. آن‌ها بر اساس نتایج بدست آمده از مدل نحوه طراحی یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه را نشان دادند. برخی از مطالعات بر اساس آنالیز انرژی و اقتصادی یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه توربین گازی بوده است.

¹ Costa

² Absorption Heat Pump

³ Poredos

⁴ Electrical Compressor

⁵ Calva

داولین و شیفی^۱ [۳۶] استفاده از یک سیستم تولید همزمان در بیمارستانی در شانگهای را بررسی کردند. آن‌ها مسائل مربوط به راه‌اندازی سیستم تولید همزمان و همچنین ارزیابی‌های اقتصادی آن را مطرح کردند. در مطالعاتی دیگر آنالیز محیط زیست، آنالیز انرژی و بهینه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه توربین گاز انجام شد.

۲-۴-۵ میکروتوربین

فرچیلد^۲ و همکاران [۳۷] عملکرد تجربی و تحلیلی استفاده از میکروتوربین‌ها را برای سیستم‌های تولید همزمان بررسی کردند. در مطالعه‌ای دیگر لابینو^۳ و همکاران [۳۸] الگوریتمی را برای پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های تولید همزمان معرفی کردند. مطالعات زیادی نیز شامل آنالز اقتصادی و انرژی سیستم‌های تولید همزمان است. برخی دیگر از مطالعات شامل آنالیز محیط زیست، آنالیز انرژی، آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان است.

۲-۴-۶ پیل سوختی

مطالعاتی بر روی سیستم‌های تولید همزمان شامل پیل سوختی به عنوان محرک اولیه صورت گرفت. هندرسن^۴ [۳۹] یک سیستم تولید همزمان را مدل کرد که شامل ترکیب مدل پیل سوختی با یک ساختمان شبیه‌سازی شده بود. او توانست با استفاده از این مدل عملکرد این سیستم را پیش‌بینی کند. سیفرت^۵ [۴۰] یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه پیل سوختی را مدل کرد که شامل چیلر جذبی و الکتریکی و ذخیره‌ساز سرمایشی است. سیستم بازیافت حرارتی به خوبی عمل نکرد و راندمان الکتریکی پایین بود. مطالعات دیگری نیز بر روی انواع پیل سوختی با اهداف متفاوت صورت گرفت. چن^۶ و همکاران یک سیستم تولید قدرت با پیل سوختی اکسید جامد را مورد بررسی

¹ Daolin and Shifei

² Fairchild

³ Labinov

⁴ Henderson

⁵ Seifert

⁶ Chen

قرار دادند که سیستم مورد بررسی آن‌ها توسط هیدروژن و متان تغذیه می‌شود. سیستم پیل سوختی اکسید جامد که با هیدروژن تغذیه شده است، شامل دو پیش گرم‌کن، یک پشته SOFC و محفظه‌ی پس سوز است. سوخت مصرف نشده در پیل سوختی اکسید جامد وارد محفظه‌ی پس سوز شده و پس از احتراق، حرارت تولیدی برای استفاده در ریفورمر به کار برده می‌شود. اما سیستمی که با متان تغذیه می‌شود شامل مخلوط کننده، بخار ساز، دو پیش گرم‌کن، ریفورمر خارجی، توده پیل سوختی اکسید جامد و یک محفظه‌ی پس سوز است. نتایج آنالیز چن و همکاران نشان داده است که سیستمی که با متان تغذیه می‌شود دارای راندمان بالاتری نسبت به سیستمی است که با هیدروژن تغذیه می‌شود [۴۱].

فونتل^۱ و همکاران یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد که توان خروجی از آن ۲۵۰ کیلووات است و با گاز طبیعی کار می‌کند را مورد مطالعه قرار داده‌اند. ایشان و همکارانشان یک سیستم سولفور زدا را معرفی کردند که سولفور سوخت را کم کند، سیستم آن‌ها از گازهای داغ خروجی از آند پیل سوختی اکسید جامد برای پیش گرم کردن سوخت ورودی به مبدل سوخت مورد بهره برده است. سپس گازهای داغ به دو قسمت تقسیم می‌شوند، یک قسمت از آن در محفظه‌ی پس سوز با هوای خروجی از کاتد می‌سوزد و قسمت دیگر با سوخت ورودی به مخلوط کننده تبادل حرارت می‌کند. گازهای خروجی از محفظه‌ی پس سوز نیز برای تولید بخار آب بکار می‌رود و راندمان سیستم می‌تواند در حالت تولید همزمان تا ۸۵٪ برسد [۴۲].

زینک^۲ و همکاران نیز یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد را با گرمایش جذبی و سیستم‌های سرمایشی برای کاربردهای مسکونی معرفی کرده‌اند. نتیجه‌ی آنالیز آن‌ها نشان داده است که سیستم این ظرفیت را دارد که هم برق، حرارت و سرما تولید کند و راندمان آن در حالت تولید همزمان می‌تواند تا ۸۷٪ برسد [۴۳].

^۱ Fontell
^۲ Zink

مطالعات زیادی در زمینه‌ی بررسی عملکرد این سیستم‌ها صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیق رادولسکو که یک پیل سوختی پلیمری ۴,۵ کیلوواتی که به عنوان محرک اصلی یک سیستم تولید همزمان است را مورد آزمایش قرار داده است و تاثیر جریان بر راندمان الکتریکی پیل سوختی و راندمان ریفورمر مورد بررسی قرار گرفته است [۴۴].

وانگ یک سیستم تولید همزمان بر پایه‌ی پیل سوختی پلیمری را بررسی کرده است و به تاثیر پارامترهای کلیدی مانند دبی گاز ورودی و دبی آب خنک کاری و دمای کاری سیستم بر عملکرد کلی پرداخته شده است [۴۵].

مینگ نی و همکارانش آنالیز انرژی و انرژی یک سیستم تولید همزمان بر پایه‌ی محرک اصلی پیل سوختی پلیمری انجام داده‌اند و در تحقیقشان به تأثیر دمای کاری پیل، چگالی جریان و پارامترهای هندسی پیل بر راندمان آن پرداخته اند [۴۶].

ژائو و همکارانش آنالیز پارامتریکی را بر روی یک سیستم تولید قدرت همزمان که محرک اصلی آن پیل سوختی پلیمری بود و از ORC برای استفاده از انرژی اتلافی بهره برده است را انجام داده‌اند. آنها بررسی کردند که به ازای سیال عامل‌های مختلف ارگانیک بیشترین بازده سیکل چقدر است و در نهایت، تعیین کردند که کدام سیال عامل بهترین انتخاب برای سیکل ارائه شده، می باشد [۴۷].

وانگ یک سیستم میکرو تولید همزمان برق، حرارت و سرما را معرفی کرده است و تاثیر ضرایب تعادل پیل سوختی و فاکتور مصرف سوخت بر راندمان سیستم مورد بحث قرار گرفته است [۴۸].

یو و همکاران یک سیستم تولید همزمان سه گانه با پیل سوختی اکسید جامد را بررسی نمودند. سیکل جذبی مورد نظر سیستم لیتیوم بروماید-آب دو اثره بود. در تحقیق آنها تحلیل جرم و انرژی سیکل صورت گرفته و تاثیر پارامترهای مهم بر عملکرد سیکل بررسی شده است [۴۹].

چیانگ یک مطالعه پارامتریک روی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما انجام داده است و تاثیر دمای ژنراتور روی ضریب عملکرد چیلر را در این مطالعه مورد بررسی قرار داد [۵۰].

بارلی نیز به آنالیز ترمودینامیکی روی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما پرداخته است و سیستم را در دو حالت مورد مقایسه قرار داده است. حالت اول با استفاده از پیل سوختی پلیمری به عنوان محرک اصلی و حالت دوم از پیل سوختی اکسید جامد به عنوان محرک اصلی استفاده شده است و راندمان انرژی و انرژی سیستمها مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشان داد که پیل سوختی پلیمری دارای راندمانهای بالاتری است [۵۱].

یک سیستم تولید همزمان بر پایه‌ی پیل سوختی اسید فسفریک توسط آقای دادس ارائه شده است. ایشان و همکارانشان نشان دادند که راندمان الکتریکی پیل‌های سوختی اسید فسفریک بین ۳۷-۴۲٪ است اما وقتی در سیستم‌های تولید همزمان به کار می‌روند، راندمان آنها می‌تواند به ۸۵٪ نیز برسد [۵۲].

فرگوسن و همکارانش که روی مدل‌سازی یک سیستم تولید همزمانی که پیل سوختی پلیمری محرک اصلی آن است و کاربرد ساختمانی دارد کار کرده‌اند و به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی قدرت الکتریکی خروجی از پیل پرداخته‌اند [۵۳].

سوگویرا و همکاران نیز به امکان‌سنجی استفاده از پیل سوختی کربنات مذاب برای کاربردهای تولید همزمان مورد بررسی قرار داده‌اند. سیستم تولید همزمانی بر پایه پیل سوختی کربنات مذاب بر اساس تعداد اعضای یک خانواده طراحی شده است و مباحث اقتصادی این سیستم مورد بررسی ایشان قرار گرفته است [۵۴].

قاسمی و همکارانش نیز یک سیستم تولید همزمان را بر پایه‌ی پیل سوختی کربنات مذاب و ترکیب شده با توربین گاز مدل کرده‌اند و در تحقیقشان ترکیب گازهای خروجی از پیل سوختی، افت‌های

پیل سوختی ، ولتاژ پیل سوختی، توان خروجی پیل سوختی و راندمان الکتریکی پیل سوختی محاسبه شده است [۵۵].

ناپولی و همکارانش به یک آنالیز مقایسه‌ای تکنو- اکونومیک برای یک سیستم تولید همزمان بین پیل سوختی اکسید جامد و پیل سوختی پلیمری انجام داده‌اند. آنالیز اقتصادی این دو سیستم انجام شد و نشان داده شد که پیل سوختی اکسید جامد به خاطر مصرف کمتر انرژی اولیه برای این کاربردها مناسب‌تر است [۵۶].

نجفی و همکارانش یک سیستم تولید همزمان بر پایه‌ی دو نوع پیل سوختی را مدل‌سازی کرده‌اند. طبق محاسبات خود به این نتیجه رسیدند که با جایگزینی پیل سوختی پلیمری دما بالا با پیل سوختی دما پایین راندمان الکتریکی از ۲۱/۲٪ به ۲۹/۲٪ می‌رسد [۵۷].

آدام در زمینه استفاده از سیستم‌های تولید همزمان بر پایه‌ی پیل‌های سوختی مختلف پژوهشی انجام داد و در آن به مناسب بودن پیل‌های سوختی پلیمری برای کاربردهای ساختمانی، به دلیل چگالی قدرت بالا و راندمان کلی بالا اشاره کرده است [۵۸].

هوانگ و همکاران یک سیستم تولید همزمان با محرک اصلی پیل سوختی را که با سوخت متانول کار می‌کند را آنالیز کرده‌اند میزان راندمان سیکل را به صورت عددی محاسبه کرده‌اند و در نهایت با یک مدل تجربی مورد مقایسه قرار داده‌اند [۵۹].

یاری و همکارانش به طراحی و ساخت یک پکیج تولید همزمان برق، حرارت و سرما پرداخته‌اند و سیستم ساخته شده توسط ایشان از سیستم سرمایه‌ی میسوتسنکو استفاده می‌کند و تحلیل انرژی اگزرژی این سیستم انجام شده است [۶۰].

۲-۵ معرفی کار حاضر

در تحقیقات انجام شده تا به حال چیلر جذبی با سیستم پیل سوختی پلیمری ترکیب نشده است. در واقع در بیشتر کارها از چیلرهای دیگر برای تامین نیازهای سرمایش استفاده شده است. در این تحقیق چیلر جذبی با آرایش‌های نوینی با پیل سوختی پلیمری ترکیب شده است و در یکی از این آرایش‌ها مبدل سوخت متان به هیدروژن نیز تغییر کرده و به گونه‌ای طراحی شده است که دمای گازهای خروجی از مبدل بالاتر از حالت معمول باشد. در این تحقیق یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه‌ی پیل سوختی پلیمری برای کاربردهای ساختمانی پیشنهاد شده است، این سیستم از تانک ذخیره حرارتی و چیلر جذبی برای استفاده از حرارت اتلافی در پیل سوختی پلیمری و مبدل متان به هیدروژن بهره برده است. همچنین تحلیل سیستم از چهار دیدگاه انرژی، اگزرژی، زیست محیطی و میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت انجام شده است در حالیکه در عمده‌ی کارهایی که به بررسی عملکرد سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه‌ی پیل سوختی پلیمری پرداخته‌اند، به تحلیل یک یا دو دیدگاه از این چهار دیدگاه بسنده شده است. در این سیکل در ابتدا مدل‌های انرژی و اگزرژی برای پیل سوختی پلیمری و چیلر جذبی ارائه شده، سپس با کمک این مدل‌ها، راندمان‌های انرژی، اگزرژی و میزان بازگشت ناپذیری تولیدی در اجزای چیلر و پیل سوختی محاسبه شده است. البته با توجه به اینکه مقدار انرژی محلول لیتیوم بروماید-آب در جداول موجود نیست، از یکی از مدل‌های معرفی شده برای محاسبه‌ی انرژی محلول استفاده شده است. سپس سیستم پیشنهاد شده، با سیستم‌های سنتی تولید برق و حرارت مورد مقایسه قرار گرفت و آنالیز سیستم از لحاظ میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت و میزان کاهش آلاینده‌ی انجام شده است. و در نهایت نیز تاثیر عوامل مختلفی از پیل بر هر چهار دیدگاه انرژی، اگزرژی، زیست محیطی و صرفه‌جویی در مصرف سوخت نیز بررسی شد.

فصل سوم

مدل سازی

۱-۳ مقدمه

در این فصل مدل سازی سیستم CCHP بر پایه ی پیل سوختی پلیمری مورد بررسی در این پایان نامه شامل اجزای مختلفی می باشد که از آن جمله می توان به پیل سوختی پلیمری، مبدل متان به هیدروژن، چیلر جذبی، تانک ذخیره حرارتی، بویلر، پمپ و کمپرسور اشاره کرد. در این فصل به فرضیات مدل سازی و معادلات حاکم بر اجزای این سیکل پرداخته خواهد شد. همچنین با مدل سازی پیل سوختی میزان کار تولیدی و حرارت تولیدی پیل قابل محاسبه است و سپس با داشتن میزان حرارت تولیدی در سیستم پیل سوختی، آرایش هایی برای بهره برداری از این حرارت اتلافی ارائه می شوند. در پایان نیز راندمان های انرژی، انرژی و درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده های نیز محاسبه می شوند.

۲-۳ فرضیات و روابط حاکم بر مدل سازی

فرضیات:

فرضیات انجام شده در مدل سازی به شرح زیر است [۴۷ و ۶۱]:

- سیستم به حالت پایا برسد.
- واکنش های شیمیایی سیستم به حالت تعادل برسند.
- هوا در پیل سوختی و مشعل شامل ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن است.
- فشار کاری پیل سوختی ۳ بار است.
- ضرایب گرمای ویژه ثابت در نظر گرفته شده است.
- فرض شده است که عایق بندی پیل سوختی به گونه ای است که نشد حرارتی تولیدی توسط پیل به محیط قابل صرف نظر است و آب سرد عبوری تمام انرژی حرارتی پیل را دریافت کند.

- دمای محیط ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است.

- فشار محیط ۱ بار فرض شده است.

در این کار به مدل سازی و تحلیل ترمودینامیکی انرژی و انرژی دو آرایش سیکل، CCHP با محرک اولیه پیل سوختی پلیمری پرداخته شده است. همچنین تغییرات راندمان انرژی، انرژی، درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی سیکل در سه حالت تولید برق، برق و حرارت دوگانه و یا برق، حرارت و سرما انجام سه گانه بررسی شده است و به تأثیر پارامترهای کلیدی پیل سوختی بر عملکرد کل سیستم پرداخته شده است.

۳-۳ مدل سازی پیل سوختی پلیمری

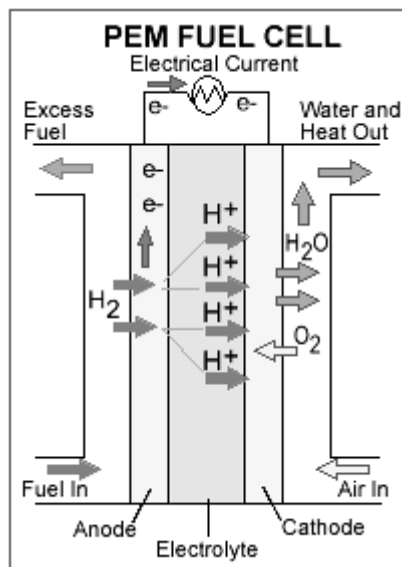
پیل‌های سوختی با توجه به نوع کاربردی که برای آن‌ها مد نظر است، انواع مختلفی دارند که از آن جمله می‌توان به پیل‌های سوختی اکسید جامد، قلیایی، اسید فسفریکی، متانولی و پلیمری نام برد. دمای کاری هر کدام از این پیل‌ها متفاوت است ولی پیل سوختی‌ای که در این تحقیق مد نظر است، پیل سوختی پلیمری است، این پیل‌ها دارای غشای جامد پلیمری از جنس نافیون هستند. غالباً این پیل‌ها در محدوده دمایی پایین، بین ۶۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند و عموماً دمای کاری آن‌ها ۸۰ درجه سانتی‌گراد است. این نوع از پیل‌های سوختی دارای غشایی انعطاف‌پذیر هستند و به این دلیل دچار شکستگی و ترک خوردگی نمی‌شوند و برای کاربردهای خانگی و حمل‌ونقل مناسب است. این نوع از پیل‌های سوختی برای تسریع واکنش شیمیایی از کاتالیستی پلاتینی بهره می‌برند و وجود این کاتالیست باعث شده است که این نوع از پیل‌های سوختی در رده پیل‌های سوختی گران قیمت قرار گیرند [۶۲]. در پیل‌های سوختی پلیمری هیدروژن در آند یونیزه می‌شود، الکترون‌های آن جدا می‌گردد و یون‌های هیدروژن که دارای بار مثبت شده‌اند به سمت کاتد روانه می‌گردند ولی در مسیر عبور از غشا پلیمری، الکترون‌ها نمی‌توانند از این غشا عبور کنند، از مدار خروجی این الکترون‌ها می‌-

گذرند و این امر موجب تولید کار بصورت الکتریسیته می‌گردد و در نهایت در کاتد الکترون‌ها و اکسیژن و هیدروژن باهم واکنش داده، آب و گرما تولید می‌کنند [۶۲].

در پیل‌های سوختی پلیمری از هیدروژن خالص باید به‌عنوان سوخت استفاده شود و برخلاف پیل‌های سوختی اکسید جامد برای جلوگیری از مسمومیت کاتالیست در اثر تشکیل کربن مونوکسید نمی‌توان از سوخت‌های هیدروکربن استفاده نمود و باید از یک ریفورمر خارجی استفاده نمود [۶۲].

در مقایسه با انواع دیگر پیل‌های سوختی، برای یک حجم و وزن معلوم پیل سوختی پلیمری توان بیشتری تولید می‌کند. این نوع پیل سوختی به دلیل دمای پائین به زمان کمی برای راه‌اندازی نیاز دارند و همین خصوصیت آن‌ها را بهترین گزینه در کاربردهای وسایل نقلیه به‌عنوان جایگزین برای موتور احتراق داخلی دیزلی و بنزینی معرفی می‌نماید. همچنین این محرک‌های اولیه کاربری مناسبی در زمینه مولدهای خانگی، نیروگاهی کوچک، صنعت حمل‌ونقل و نظامی دارند.

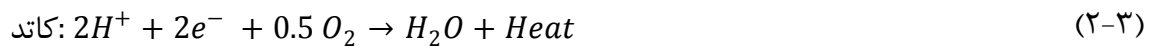
در این قسمت به مدل‌سازی انرژی و انرژی پیل سوختی پلیمری پرداخته شده است و در شکل (۳-۱) نمونه‌ای از این نوع پیل سوختی نشان داده شده است.



شکل (۳-۱): نحوه عملکرد پیل سوختی پلیمری

۳-۳-۱ تحلیل قانون اول پیل سوختی پلیمری

واکنش‌های انجام‌شده در پیل سوختی پلیمری در روابط (۳-۱) تا (۳-۳) آمده است [۶۳].



ولتاژ مدار باز سیستم‌های پیل سوختی، ولتاژ بازگشت پذیر پیل می‌باشد و به ولتاژ نرنست معروف است و طبق رابطه‌ی (۳-۴) به دست می‌آید [۴۷].

$$E_{Nernst} = \frac{-\Delta G^0}{n_e F} + \frac{RT_{fc}}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}^{sat}} \right) \quad (۳-۴)$$

در معادله‌ی (۳-۴) $-\Delta G^0$ تغییرات انرژی آزاد گیبس n_e تعداد الکترون منتقل‌شده، R ثابت جهانی گازها، T_{fc} دمای کاری پیل سوختی در مقیاس کلوین، F ثابت فارادی و برای به دست آوردن ولتاژ نرنست در معادله بالا نیازمند داشتن P_j ها هستیم که این نشان‌دهنده فشار جزئی واکنش‌دهنده‌ها می‌باشد. برای حل این معادله ابتدا فشار جزئی بخار آب از رابطه‌ی تجربی (۳-۵) قابل محاسبه است [۴۷].

$$\log(P_{H_2O}^{sat}) = -2.1794 + 0.02953t - 9.1837 \times 10^{-5}t^2 + 1.4454 \times 10^{-7}t^3 \quad (۳-۵)$$

در رابطه‌ی تجربی (۳-۵)، t ، دمای کاری پیل سوختی در واحد درجه سانتی‌گراد است و برای به دست آوردن فشارهای جزئی هیدروژن و اکسیژن نیز از روابط (۳-۶) و (۳-۷) استفاده می‌شود [۴۷].

$$P_{H_2} = (0.5P_{H_2O}^{sat}) \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{1.653i}{T_{fc}^{1.334}}\right) \times x_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (6-3)$$

$$P_{O_2} = P \left[1 - x_{H_2O}^{sat} - x_{N_2}^{channel} \exp\left(\frac{0.291i}{T_{fc}^{0.832}}\right) \right] \quad (7-3)$$

در روابط (۶-۳) و (۷-۳) فشار کاری پیل سوختی بر حسب بار، i چگالی جریان بر حسب آمپر بر سانتی متر مربع و $x_{H_2O}^{sat}$ کسر مولی آب و $x_{N_2}^{channel}$ کسر مولی نیتروژن است [۴۷].

$$x_{N_2}^{channel} = \frac{(x_{N_2,in} - x_{N_2,out})}{\ln\left(\frac{x_{N_2,in}}{x_{N_2,out}}\right)} \quad (8-3)$$

$$x_{N_2,in} = 0.79(1 - x_{H_2O}^{sat}) \quad (9-3)$$

$$x_{N_2,out} = \frac{1 - x_{H_2O}^{sat}}{1 + \left(\frac{\lambda_{air} - 1}{\lambda_{air}}\right)\left(\frac{0.21}{0.79}\right)} \quad (10-3)$$

در واقعیت، در پیل‌های سوختی میزان ولتاژ به دست آمده کمتر از ولتاژ نرنست است و علت این امر وجود بازگشت‌ناپذیری‌هایی است که به نام‌های تلفات اهمی V_{ohm} ، تلفات غلظت V_{conc} و تلفات فعال‌سازی V_{act} شناخته شده است و ولتاژ واقعی به دست آمده از رابطه‌ی (۱۱-۳) پیروی می‌کند [۶۰].

$$V_{fc} = E_{ernst} - V_{act} - V_{conc} - V_{ohm} \quad (11-3)$$

در رابطه‌ی (۱۱-۳) برای به دست آوردن ولتاژ واقعی علاوه بر محاسبه ولتاژ نرنست باید افت ولتاژهای بعدی را نیز محاسبه کرد برای محاسبه این افت‌ها از روابط (۱۲-۳) تا (۱۵-۳) می‌توان استفاده نمود [۶۳].

$$V_{act} = -[-0.948 + \varepsilon T_{fc} + 0.000076 T_{fc} (\ln(I)) - 0.000193 T_{fc} (\ln(C_{O_2,conc}))] \quad (12-3)$$

$$\varepsilon = 0.00286 + 0.0002 \ln(A_{cell}) + 0.000043 \ln(C_{H_2,conc}) \quad (13-3)$$

$$C_{O_2,conc} = 1.97 \times 10^{-7} P_{O_2} \exp\left(\frac{498}{T_{fc}}\right) \quad (14-3)$$

$$C_{H_2,conc} = 9.174 \times 10^{-7} P_{H_2} \exp\left(\frac{-77}{T_{fc}}\right) \quad (15-3)$$

با استفاده از روابط (۱۲-۳) تا (۱۵-۳) می‌توان افت ولتاژ فعال‌سازی را محاسبه نمود که در روابط بالا $C_{H_2,conc}$ بر غلظت هیدروژن و $C_{O_2,conc}$ بر غلظت اکسیژن دلالت دارد، برای محاسبه افت ولتاژ غلظتی می‌توان از رابطه‌ی (۱۶-۳) استفاده نمود [۴۷].

$$V_{conc} = \frac{RT_{fc}}{n_e F} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (16-3)$$

که در رابطه‌ی (۱۶-۳) i_L چگالی حدی جریان است که پیل سوختی در این چگالی دارای ولتاژ خروجی صفر می‌باشد. در ادامه برای محاسبه افت ولتاژ اهمی از قانون اهم استفاده می‌کنیم که از روابط (۱۷-۳) و (۱۸-۳) قابل استخراج است [۶۰].

$$V_{ohm} = IR_{int} \quad (17-3)$$

$$R_{int} = \frac{r_{mem} L}{A_{cell}} \quad (18-3)$$

و در نهایت با داشتن روابط (۱۱-۳) الی (۱۸-۳) میزان واقعی ولتاژ را می‌توان محاسبه نمود و پس از محاسبه ولتاژ واقعی کار خروجی از پیل از رابطه‌ی (۱۹-۳) به دست می‌آید [۶۲].

$$W_{fc} = N_{cell} V_{fc} I \quad (19-3)$$

حال برای محاسبه‌ی میزان حرارت خالص تولیدی در پیل سوختی با استفاده از قانون اول ترمودینامیک رابطه‌ی (۲۰-۳) به دست می‌آید [۴۷].

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{ch} - \dot{Q}_{s,l} - \dot{W}_{fc} \quad (20-3)$$

\dot{Q}_{net} بر حرارت تولیدی خالص که در پیل به وجود می‌آید و قابل تبادل با سیال خنک‌کننده است، \dot{Q}_{ch} نرخ حرارت تولیدی در اثر انجام واکنش شیمیایی بین هیدروژن و اکسیژن است، $\dot{Q}_{s,l}$ نرخ حرارتی که به صورت محسوس و نهان موجب بالا رفتن دمای محصولات واکنش می‌گردد \dot{W}_{fc} نرخ کار تولیدی به صورت انرژی الکتریکی در پیل سوختی است که نرخ کار تولیدی از روابط بالا محاسبه شد اما حرارت شیمیایی و نهان و محسوس با استفاده از روابط (۲۱-۳) تا (۲۵-۳) قابل محاسبه است [۴۷].

$$\dot{n}_{H_2cons} = N_{cell} \frac{iA}{2F} \quad (21-3)$$

$$\dot{n}_{O_2cons} = N_{cell} \frac{iA}{4F} \quad (22-3)$$

$$\dot{n}_{H_2Ogen} = N_{cell} \frac{iA}{2F} \quad (23-3)$$

$$\dot{n}_{H_2in} = \lambda_{H_2} \dot{n}_{H_2cons} \quad (24-3)$$

در رابطه‌ی (۲۴-۳) λ_{H_2} ضریب استوکیومتری هیدروژن در پیل سوختی است که اصولاً در پیل‌های سوختی پلیمری درصد سوخت ورودی بیشتر از مقدار مورد نیاز است و بسته به نوع پیل سوختی این عدد تعیین می‌شود. حال با داشتن دبی مولی‌های واکنش‌دهنده‌ها می‌توان حرارت تولیدی و مصرفی را به دست آورد [۴۷].

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{n}_{H_2cons} \cdot HHV \quad (25-3)$$

$$\dot{Q}_{s,l} = C_{H_2} (\dot{n}_{H_2,out} T_{fc} - \dot{n}_{H_2,in} T_{amb}) + C_{O_2} (\dot{n}_{O_2,out} T_{fc} - \dot{n}_{O_2,in} T_{out,comp})$$

$$+C_{N_2}(\dot{n}_{N_2,out}T_{fc}-\dot{n}_{N_2,in}T_{out,comp})+\dot{n}_{H_2O,gen}C_{H_2O}(T_{fc}-T_{amb})$$

$$+\dot{n}_{H_2O,gen}H_v \quad (26-3)$$

۲-۳-۳ تحلیل قانون دوم پیل سوختی پلیمری

آنالیز انرژی پیل سوختی پلیمری اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهد، در واقع این کار به فهم اینکه قدرت خروجی از پیل سوختی پلیمری بر حسب اینکه سوخت ورودی به پیل حداکثر چه مقدار کار می‌توانست تولید کند، کمک می‌کند. آنالیز انرژی پیل سوختی با کمک قوانین بقای جرم، اول ترمودینامیک و دوم ترمودینامیک انجام می‌شود. بطور کلی برای یک حجم کنترل آنالیز انرژی پیل سوختی (۳-۲۶) انجام می‌پذیرد [۶۴].

$$\sum \dot{E}X_{in} - \sum \dot{E}X_{out} + \sum_k \dot{E}X^Q - \sum \dot{E}X^W - \sum \dot{I} = 0 \quad (26-3)$$

که در رابطه‌ی (۳-۲۶)، $\sum \dot{E}X_{in}$ نرخ انرژی ورودی است، $\sum \dot{E}X_{out}$ نرخ انرژی خروجی، $\sum_k \dot{E}X^Q$ انرژی انتقال حرارت منتقل می‌شود، $\sum \dot{E}X^W$ انرژی انتقال کار تبادل می‌شود و $\sum \dot{I}$ انرژی تخریب یا بازگشت ناپذیری است. ترم $\dot{E}X$ با رابطه‌ی (۳-۲۷) تعریف می‌شود که حاصل جمع انرژی فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل می‌باشد [۶۴].

$$\dot{E}X = \dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch} + ex_{kn} + ex_{pt}) \quad (27-3)$$

در پیل‌های سوختی پلیمری انرژی فیزیکی و شیمیایی مد نظر است و از انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می‌شود. در نتیجه رابطه‌ی (۳-۲۷) ساده شده و به رابطه‌ی (۳-۲۸) تبدیل می‌گردد [۶۴].

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (28-3)$$

عبارت کلی برای انرژی فیزیکی در رابطه‌ی (۳-۲۹) آمده است که در این رابطه دمای مرجع ۲۹۸ کلونین و فشار مرجع یک اتمسفر در نظر گرفته شده است [۶۴].

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (29-3)$$

که در رابطه‌ی (29-3) h بر انتالپی و S برانتروپی دلالت دارد و زیر نویس صفر به معنای شرایط محیطی است. این رابطه برای یک گاز ایده‌آل به شکل رابطه‌ی (30-3) در می‌آید [64].

$$ex_{ph} = C_p T_0 \left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (30-3)$$

برای محاسبه‌ی انرژی شیمیایی پیل سوختی از رابطه‌ی (31) استفاده می‌شود [64].

$$ex_{ch} = \sum x_n ex_{ch}^n + RT_0 \sum x_n \ln x_n \quad (31-3)$$

که x_n کسر جرمی جز n ام است که ex_{ch}^n انرژی شیمیایی استاندارد جز n ام است که در حالت مرده اندازه گرفته شده است و مقادیر انرژی شیمیایی در جدول (3-1) آمده است [66 و 65]. برای محاسبه‌ی مقادیر انرژی که در اثر کار و انتقال حرارت با محیط تبادل می‌گردد از روابط (32-3) و (33-3) استفاده می‌گردد [64].

$$\sum \dot{E}X^W = \dot{W}_{net} \quad (32-3)$$

$$\sum_k \dot{E}X^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_{fc}}\right) \dot{Q}_{net} \quad (33-3)$$

با کمک روابط (21-3) تا (23-3) و داشتن توان خروجی از پیل سوختی، چگالی جریان، تعداد سلول می‌تواند دبی مولی هیدروژن و اکسیژن ورودی به پیل سوختی و آب تولیدی در پیل سوختی را بدست آورد و نیز با کمک روابط (34-3) و (35-3) نیز دبی هیدروژن و هوای مصرف نشده نیز قابل محاسبه است [47].

$$\dot{n}_{H2out} = \lambda_{H2} \dot{n}_{H2in} \quad (34-3)$$

$$\dot{n}_{O2out} = \lambda_{air} \dot{n}_{O2in} \quad (3-35)$$

جدول (۳-۱): اگزرژی‌های شیمیایی مواد [۶۶و۶۵]

ماده	کسر جرمی	اگزرژی شیمیایی ($\frac{j}{kg}$)
اکسیژن	۰/۲۰۲	۱۲۴۰۰۰
نیتروژن	۰/۷۷۵	۲۵۷۱۴
آب	۰/۰۱۸	۵۰۵۵۰
هیدروژن	۱	۱۱۸۰۵۰۰۰۰
آب تولیدی	۱	۵۰۵۵۰

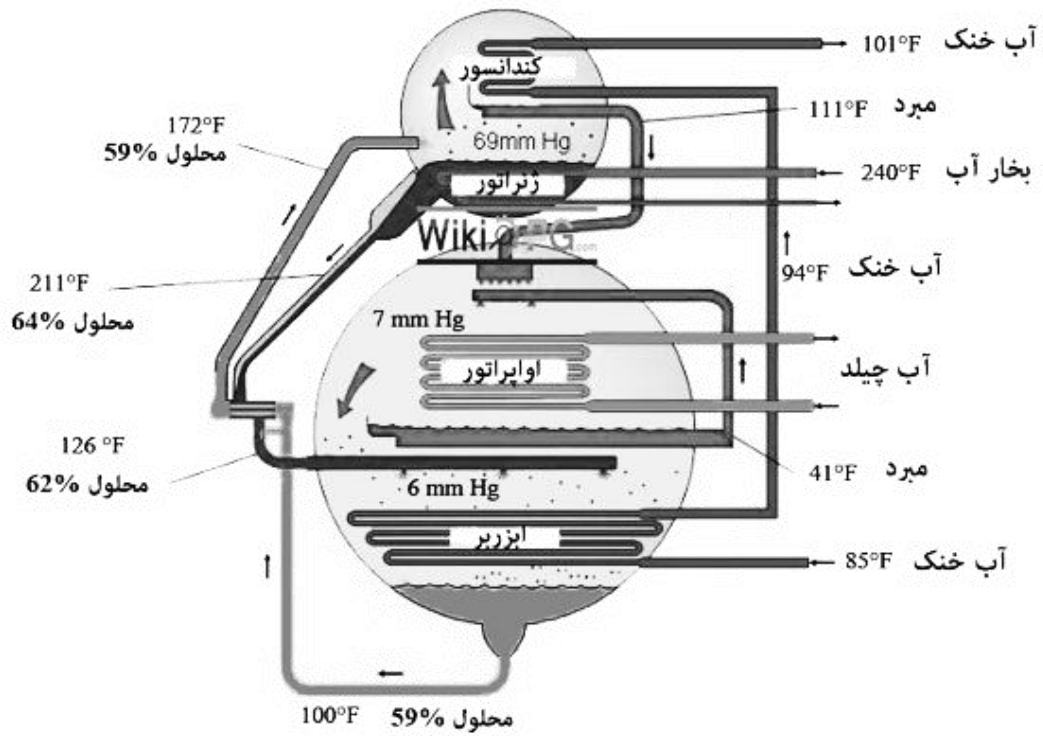
۳-۴ چیلر جذبی

چیلرهای جذبی^۱ سیستم‌هایی هستند که دارای ژنراتور و جذب‌کننده هستند و برخلاف چیلرهای تراکمی که از انرژی الکتریکی به عنوان انرژی اولیه استفاده می‌کنند این چیلرها از حرارت به‌عنوان انرژی اولیه استفاده می‌کنند که چون محرک اصلی این چیلرها انرژی حرارتی است، حرارت اولیه به ژنراتور داده می‌شود. نمونه‌ای از چیلر جذبی در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. این چیلرها راه‌حل خوبی برای استفاده از انرژی‌های حرارتی اتلافی است و یکی از کاربردهای این سیستم‌ها در سیستم‌های تولید همزمان است. در ادامه مدل‌سازی چیلر جذبی ارائه خواهد شد.

۳-۴-۱ تحلیل قانون اول چیلر جذبی

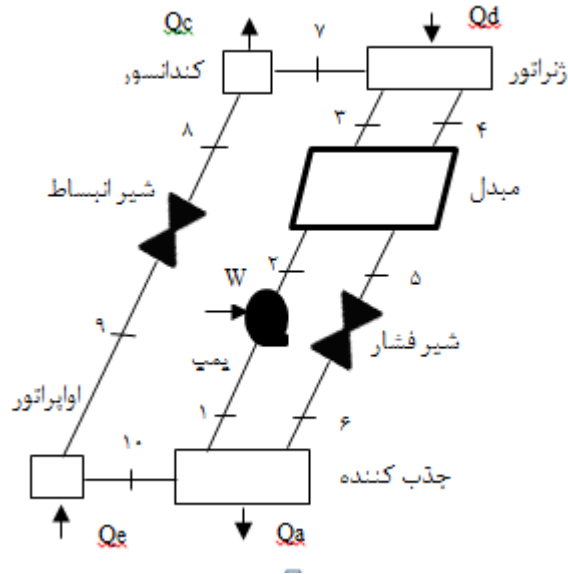
در این چیلر جذبی از لیتیوم بروماید به‌عنوان جذب‌کننده و از آب به‌عنوان مبرد استفاده می‌شود. همان‌طور که از شکل (۳-۳) مشخص است گرما در دی‌زوربر به مخلوط آب و لیتیوم-بروماید داده می‌شود و سپس آب بخار شده و به کندانسور می‌رود و در کندانسور حرارت از دست می‌دهد، تبدیل

^۱. Absorption Chiller



شکل (۳-۲): نحوه عملکرد چیلر جذبی

به مایع می‌گردد و آب از شیر فشارشکن عبور کرده، در اوپراتور حرارت موردنیاز برای تبرید را جذب کرده و به ابزوربر می‌رود و در ابزوربر در اثر اختلاط با لیتیوم- بروماید که فرآیندی گرماده است گرما



شکل (۳-۳): نحوه عملکرد چیلر جذبی تک اثره

از دست می‌دهد و مخلوط حاصل پمپ می‌شود به ژنراتور و دوباره این سیکل تکرار می‌گردد [۶۸].

در سیکل مورد بررسی گازهای خروجی از محفظه احتراق به ژنراتور رفته و حرارت خود را از دست می‌دهد و محرک اصلی سیکل تبرید جذبی است، برای مبدل حرارتی چیلر جذبی روابط (۳۶-۳) تا (۳۹-۳) برقرار است [۶۸].

$$Eff_{Hx} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} \quad (36-3)$$

$$C_{hot} = m_4 \cdot \left[\frac{h_4 - h_5}{T_4 - T_5} \right] \quad (37-3)$$

$$C_{cold} = m_2 \cdot \left[\frac{h_3 - h_2}{T_3 - T_2} \right] \quad (38-3)$$

$$Q_{hx} = m_1 \cdot (h_3 - h_2) = m_4 \cdot (h_4 - h_5) \quad (39-3)$$

که در روابط (۳۶-۳) تا (۳۹-۳) Eff_{Hx} کارایی مبدل حرارتی است و Q_{hx} حرارتی است که بین دو جریان جرمی ورودی به دیزوربر و دبی جرمی خروجی از دیزوربر برای ورود به ایزوربر تبادل می‌گردد. روابط حاکم بر دیزوربر در روابط (۴۰-۳) تا (۴۲-۳) آورده شده است [۶۸].

$$m_3 = m_4 + m_7 \quad (40-3)$$

$$m_3 x_3 = m_4 x_4 \quad (41-3)$$

$$m_3 h_3 - m_4 h_4 - m_7 h_7 + Q_d = 0 \quad (42-3)$$

در روابط (۴۰-۳) تا (۴۲-۳) x غلظت و Q_d گرمایی است که در اثر عبور گازهای خروجی از محفظه احتراق به دیزوربر مبادله می‌گردد و معادلات حاکم بر کندانسور، شیر فشارشکن و اواپراتور در روابط (۴۳-۳) تا (۴۶-۳) آمده است [۶۸].

$$Q_c = m_7(h_7 - h_8) \quad (43-3)$$

$$Q_e = m_9(h_{10} - h_9) \quad (44-3)$$

$$m_{10}h_{10} + m_6h_6 - Q_a - m_1h_1 = 0 \quad (45-3)$$

$$COP = \frac{Q_E}{Q_d} \quad (46-3)$$

۳-۴-۲ تحلیل قانون دوم چیلر جذبی

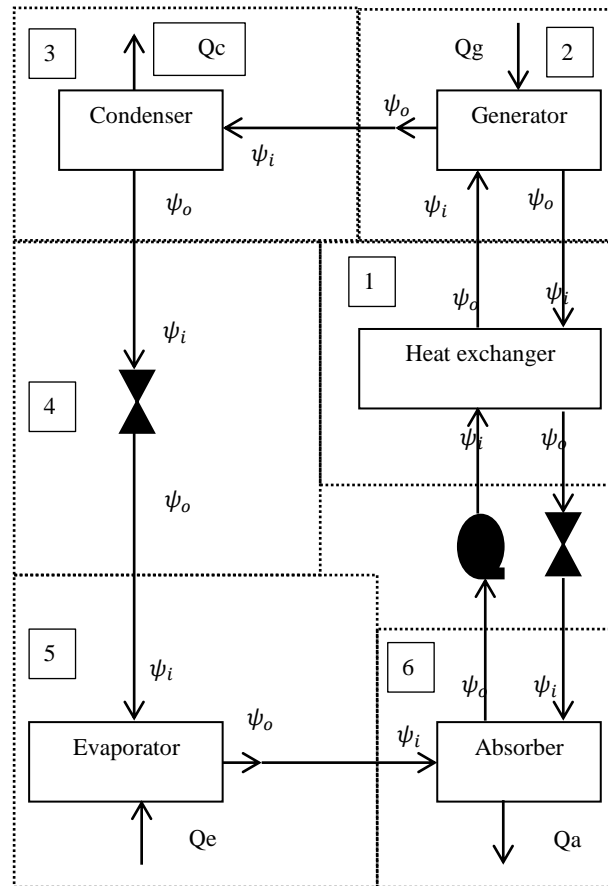
آنالیز انرژی به محاسبه‌ی تخریب انرژی کمک می‌کند و راهی برای تحلیل قانون دوم ترمودینامیک است. انرژی یک جریان از سیال از رابطه‌ی (۳-۴۷) پیروی می‌کند [۶۹].

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (47-3)$$

در معادله‌ی (۳-۴۷) نماد ψ نشان دهنده‌ی انرژی جریان سیال است و h ، T ، s و نماد صفر به ترتیب بر انتالپی، دما (بر حسب کلونین)، انتروپی و حالت مرده دلالت دارند. نرخ تخریب انرژی در هر یک از اجزای چیلر جذبی را می‌توان به فرم معادله‌ی (۳-۴۸) نوشت [۶۹].

$$\Delta\psi = \sum (m\psi)_i - \sum (m\psi)_o - \left[\sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_i - \sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_o \right] + \sum W \quad (48-3)$$

در معادله‌ی (۳-۴۸) $\Delta\psi$ بازگشت ناپذیری تولیدی در هر جز چیلر جذبی است. $\sum (m\psi)_i$ و $\sum (m\psi)_o$ نرخ انرژی ورودی و خروجی، $\left[\sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_i - \sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_o \right]$ تغییر انرژی در اثر انتقال حرارت و $\sum W$ کار در هر جز چیلر جذبی است. برای تحلیل انرژی چیلر جذبی تک اثره که در این تحقیق مورد بحث است باید چیلر جذبی را به شکل (۳-۴۹) تقسیم بندی کرد و رابطه‌ی (۳-۴۸) را برای هر عضو به ازای هر ورودی خروجی نوشته و از رابطه‌ی (۳-۴۹) برای محاسبه‌ی نرخ تخریب انرژی کلی می‌توان استفاده کرد [۶۹].



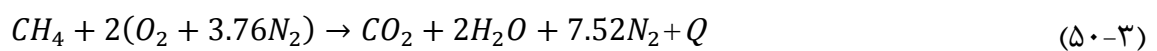
شکل (۳-۴): تقسیم بندی اگزورژی چیلر جذبی

$$\Delta\psi_T = \Delta\psi_1 + \Delta\psi_2 + \Delta\psi_3 + \Delta\psi_4 + \Delta\psi_5 + \Delta\psi_6 \quad (۴۹-۳)$$

۵-۳ بویلر و محفظه احتراق

بویلر یا دیگ بخار عبارت است از یک مخزن بسته که در آن بخار آب جهت استفاده در خارج از آن توسط گرمای ناشی از احتراق سوخت تولید می‌شود. داخل دیگ بخار شامل دو بخش طرف آتش و طرف آب است. سطح گرمایی دیگ بخار به مجموع کلیه سطوح در طرف آتش دیگ بخار اطلاق می‌شود. تمام بخش‌های داخلی و تحت فشار یک دیگ بخار از آلیاژهای آهنی ساخته می‌شوند. دیگ‌های بخار از نظر نوع جنس به دو دسته چدنی و فولادی تقسیم‌بندی می‌شوند. دیگ بخار چدنی برای تولید بخار کم فشار ساخته می‌شود. اکثر دیگ‌های بخار از نوع فولادی هستند.

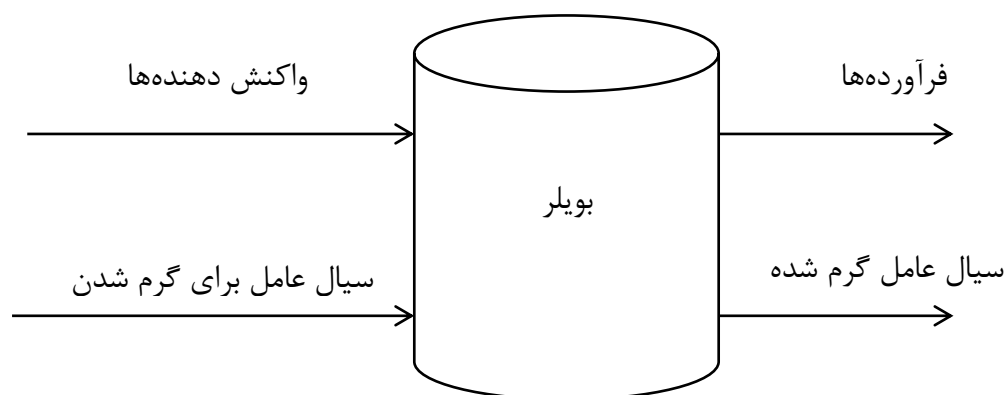
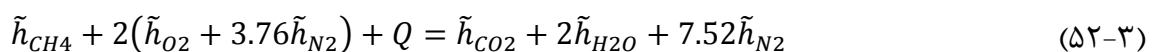
هدف در این قسمت ارائه‌ی مدل انرژی برای بویلر و محفظه‌ی احتراق است. اصولاً در بیشتر سیستم‌های تولید همزمان بویلر وجود دارد حتی اگر در سیکل حاضر نباشد به عنوان بویلر کمکی در مواقعی که تقاضای انرژی از تولید آن کمتر است وارد مدار می‌شوند. علت این که این دو سیستم در یک عنوان آورده شده است این است که این دو سیستم هر دو دارای شباهت‌های فراوانی هستند و یکی از این شباهت‌ها بحث احتراق در بویلرها و محفظه‌های احتراق است، در بویلرها فرآیند کلی احتراق گاز متان طبق معادله‌ی (۵۰-۳) اتفاق می‌افتد.



در معادله‌ی احتراق (۵۰-۳) قانون اول ترمودینامیک را می‌توان به فرم معادله‌ی (۵۱-۳) نوشت [۷۰]

$$\sum n_i \tilde{h}_i + Q = \sum n_o \tilde{h}_o \quad (51-3)$$

که بطور خاص برای واکنش (۵۲-۳) می‌توان نوشت:

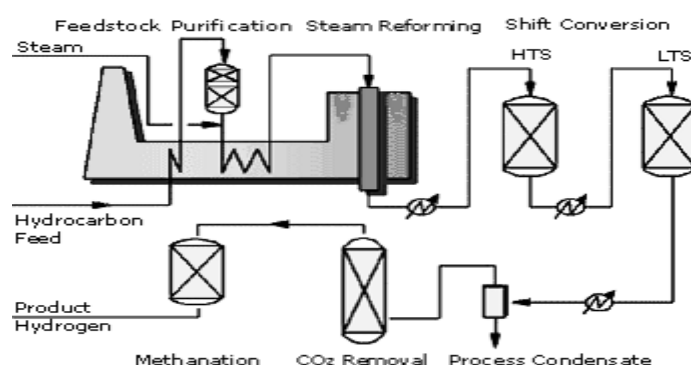


شکل (۵-۳): نمای بویلر

حال با داشتن شرایط گازهای ورودی، خروجی مقدار حرارت تولیدی را محاسبه کرد و بسته به نوع مسئله آنالیز انرژی سیستم انجام می‌شود.

۶-۳ مبدل متان به هیدروژن

روش‌های مختلفی برای تبدیل هیدروکربن‌ها به هیدروژن وجود دارند که از آن جمله می‌توان به اصلاح کننده^۱ بخار، اکسیداسیون جزئی^۲، اتوترمال ریفورمر اشاره کرد که هر کدام، واکنش‌های خاص خود را دارند. پردازش گر سوختی که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است از نوع ریفورمر بخار است که در آن واکنشی گرماگیر رخ می‌دهد و این گرما عموماً در اثر سوختن هیدروکربنی که قرار است به هیدروژن تبدیل گردد تأمین می‌شود. نمونه‌ای از یک سیستم مبدل متان به هیدروژن از نوع اصلاح کننده بخار در شکل (۶-۳) نشان داده شده است، همانطور که از شکل (۶-۳) مشخص است گاز متان و بخار آب وارد ریفورمر بخار می‌شوند و در ابتدا این دو ورودی گرم می‌شوند، در مرحله‌ی بعد واکنش اصلاح بخار رخ می‌دهد و محصولات واکنش وارد دو محفظه‌ی واکنش شیفت دما پایین و دما بالا می‌شوند و در این مرحله هیدروژن و دیگر محصولات به وجود می‌آیند، در مرحله‌ی نهایی نیز



شکل (۶-۳): مبدل متان به هیدروژن از نوع ریفورمر بخار [۷۱]

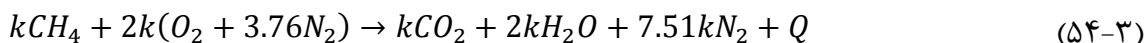
^۱ Steam Methane Reformer

^۲ Partial Oxidation

هیدروژن از محصولات واکنش جدا می‌شود و برای استفاده به مصرف کننده داده می‌شود [۶۲].

۳-۶-۱ مدل ترمودینامیکی مبدل متان به هیدروژن

در این سیستم از بخار آب و گاز طبیعی به عنوان واکنش دهنده‌ها استفاده می‌کنند و پس از انجام واکنش‌های (۳-۵۳) و (۳-۵۴) هیدروژن و کربن دی‌اکسید از آن خارج می‌گردند [۶۲].



در واکنش (۳-۵۳) آبی که در واکنش دهنده‌ها وجود دارد بصورت بخار است و دمای کاری این مبدل‌های سوخت عموماً بین ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد [۶۲] و گرمای این واکنش از طریق سوختن متان طبق واکنش (۳-۵۴) تأمین می‌گردد. در رابطه‌ی (۳-۵۴) k میزان اضافی دبی جرمی متان است که باید وارد پردازشگر سوخت شود تا عمل احتراق را صورت دهد و مقدار k از رابطه (۳-۵۵) تعیین می‌شود. میزان تغییرات انتالپی واکنش‌های بالا با کمک قانون اول ترمودینامیک و جدول (۳-۲) به‌سادگی قابل محاسبه است. راندمان ریفرمر نیز از رابطه‌ی (۳-۵۶) محاسبه می‌گردد [۶۲].

$$k = \frac{\Delta H_{SR} + \Delta H_{SHIFT}}{\Delta H_{COMBUSTION}} \quad (۳-۵۵)$$

$$\eta_{reformer} = \frac{4}{K + 1} \frac{\Delta H_{H_2}}{\Delta H_{Fuel}} \quad (۳-۵۶)$$

۳-۷ راندمان

راندمان کمیتی بدون بعد است که در علم ترمودینامیک و برای بررسی میزان عملکرد سیستم‌های ترمودینامیکی به کار می‌رود. مقدار عددی بازدهی بالاتر در یک سیستم ترمودینامیکی نشان دهنده

جدول (۳-۲) واکنش‌های انجام شده در ریفرمر بخار

نام واکنش	واکنش [۶۲]
احتراق متان (محصول بخار آب باشد)	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(g) + 802.5 \text{ kJ}$
احتراق متان (محصول آب مایع باشد)	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(l) + 890.5 \text{ kJ}$
Stem reforming	
Stem reforming (از بخار آب استفاده شود)	$CH_4 + H_2O(g) + 203 \text{ kJ} \rightarrow CO + 3H_2$
Stem reforming (از آب مایع استفاده شود)	$CH_4 + H_2O(l) + 247 \text{ kJ} \rightarrow CO + 3H_2$
واکنش شیفت گاز	
شیفت گاز (از بخار آب استفاده شود)	$CO + H_2O(g) \rightarrow CO_2 + H_2 + 37.5 \text{ kJ}$
شیفت گاز (از آب مایع استفاده شود)	$CO + H_2O(l) + 6.5 \text{ kJ} \rightarrow CO_2 + H_2$
تبخیر آب	
	$H_2O(l) + 44 \text{ kJ} \rightarrow H_2O(g)$

کارایی بالاتر آن است. این کمیت با نماد (η_{th}) بیان می‌شود و به صورت کلی به صورت مقدار خالص انرژی تولیدی به مقدار کل انرژی ورودی تعریف می‌شود.

۳-۷-۱ راندمان انرژی

پارامترهای موردنیاز برای به دست آوردن راندمان انرژی سیکل در روابط (۳-۵۷) تا (۳-۵۹) آمده است [۴۷].

$$\eta_{elec} = \frac{W_{fc}}{n_{fuel,in} \cdot HHV} \quad (۳-۵۷)$$

$$\eta_{CHP} = \frac{W_{fc} + Q_{net} - W_{comp}}{n_{fuel,in} \cdot HHV} \quad (۳-۵۸)$$

$$\eta_{CCHP} = \frac{W_{fc} + Q_{net} + Q_{evap} - W_{pump} - W_{comp}}{n_{fuel,in} \cdot HHV} \quad (59-3)$$

که در روابط (57-3) تا (59-3) HHV نشان‌دهنده ارزش حرارتی بالای هیدروژن، W_{fc} کار انجام‌شده توسط پیل سوختی، η_{elec} راندمان الکتریکی سیکل، n_{H_2in} دبی مولی هیدروژن ورودی به سیکل، η_{CHP} راندمان سیکل کار و حرارت، Q_{net} حرارت تولیدی در پیل سوختی که برای تأمین آب گرم مورد استفاده قرار می‌گیرد، W_{comp} کار انجام شده توسط کمپرسور، η_{CCHP} راندمان سیکل همزمان برق، حرارت و سرما، Q_{evap} بار حرارتی جذب‌شده از اواپراتور سیکل تبرید است.

۳-۷-۲ راندمان اگزرژی

راندمان اگزرژی الکتریکی پیل سوختی پلیمری در حالت تولید الکتریسیته به تنهایی از رابطه‌ی (۳-۶۰) یا (۳-۶۱) بدست می‌آید [۶۴].

$$\psi = 1 - \frac{\dot{i}}{\sum \dot{E} X_{in}} \quad (60-3)$$

$$\eta_{ex,el} = \frac{\dot{W}_{net}}{[\dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch})]_{H_2,in}} \quad (61-3)$$

راندمان اگزرژی برای دو حالت مختلف تولید برق و حرارت یا برق و سرما و یا تولید سه گانه به ترتیب با روابط (۳-۶۲) تا (۳-۶۴) قابل محاسبه است [۶۴].

$$\eta_{ex,Cog,h} = \frac{\dot{W}_{net} + (1 - \frac{T_{amb}}{T_{heat}})\dot{Q}_{heat}}{[\dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch})]_{H_2}} \quad (62-3)$$

$$\eta_{ex,Cog,C} = \frac{\dot{W}_{net} + (1 - \frac{T_{amb}}{T_{cool}})\dot{Q}_{cool}}{[\dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch})]_{H_2}} \quad (63-3)$$

$$\eta_{ex,CCHP} = \frac{\dot{W}_{net} + (1 - \frac{T_{amb}}{T_{cool}})\dot{Q}_{cool} + (1 - \frac{T_{amb}}{T_{heat}})\dot{Q}_{heat}}{[\dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch})]_{H_2}} \quad (64-3)$$

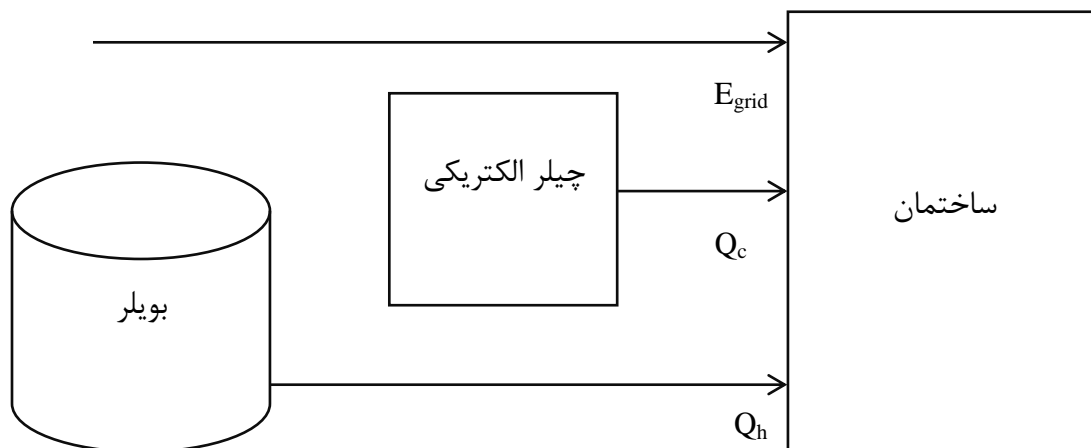
۸-۳ درصد کاهش مصرف سوختی

در این قسمت آنالیز میزان صرفه جویی مصرف انرژی محاسبه شده است برای این کار باید سیستم تولید همزمان مدل شده در این تحقیق را با سیستم‌های سنتی تولید برق و بویلرهای سنتی مقایسه کرد که یک نمای کلی از سیستم‌های سنتی در شکل (۷-۳) آمده است. برای محاسبه‌ی سوخت صرفه جویی شده در ابتدا میزان انرژی مصرف شده توسط سیستم تولید سنتی و میزان سوخت مصرفی توسط سیستم تولید همزمان با کمک روابط (۶۵-۳) و (۶۶-۳) محاسبه می‌شود [۷۳].

در روابط (۶۵-۳) و (۶۶-۳) η_{con} راندمان سیستم‌های سنتی و Q_u حرارت تولیدی در بویلر و η_b راندمان بویلر F_{CCHP} میزان سوخت مصرفی در سیستم CCHP است و F_{conv} میزان سوخت مصرفی در سیستم‌های سنتی است. میزان صرفه جویی در مصرف سوخت و درصد کاهش مصرف سوخت نیز

$$F_{CCHP} = \dot{n}_{H_2} HHV \quad (۶۵-۳)$$

$$F_{conv} = \frac{W_{fc}}{\eta_{con}} + \frac{Q_u}{\eta_b} + \frac{Q_c}{COP_e} \quad (۶۶-۳)$$



شکل (۷-۳): سیستم سنتی تامین انرژی یک ساختمان [۷۴]

طبق روابط (۶۷-۳) و (۶۸-۳) محاسبه می‌شوند، در روابط (۶۷-۳) الی (۶۸-۳) FS^1 میزان سوخت صرفه‌جویی شده و $FESR^2$ درصد صرفه‌جویی در مصرف سوخت را نشان می‌دهند [۷۳].

$$FS = \frac{W_{fc}}{\eta_{con}} + \frac{Q_u}{\eta_b} + \frac{Q_c}{COP_e} - F \quad (۶۷-۳)$$

$$FESR = \frac{\Delta F}{\frac{W_{fc}}{\eta_{con}} + \frac{Q_u}{\eta_b} + \frac{Q_c}{COP_e}} \quad (۶۸-۳)$$

۹-۳ کاهش آلاینده‌گی

در این پژوهش ارزیابی زیست محیطی سیستم نیز شده است، این ارزیابی بر اساس معیار درصد کاهش آلاینده‌ی دی اکسید کربن انجام شده است. برای محاسبه‌ی درصد کاهش انتشار دی اکسید کربن ($CDER^3$) در این سیستم تولید همزمان می‌توان از روابط (۶۹-۳) الی (۷۱-۳) استفاده نمود [۷۵].

$$CDER = 1 - \frac{CDE_{shp}}{CDE_{cchp}} \quad (۶۹-۳)$$

$$CDE_{shp} = \mu_e E_{grid}^{shp} + \mu_f F_b \quad (۷۰-۳)$$

$$CDE_{cchp} = \mu_e E_{grid}^{cchp} + \mu_f F_{on-site} \quad (۷۱-۳)$$

که در رابطه‌ی (۶۹-۳) محاسبه‌ی درصد کاهش آلاینده‌گی انجام می‌شود و $CDER$ درصد کاهش آلاینده‌گی را نشان می‌دهد، همچنین در روابط (۷۰-۳) و (۷۱-۳)، CDE میزان تولید آلاینده‌گی سیستم، μ_e و μ_f شاخص انتشار آلاینده‌ی دی اکسید کربن برای برق شبکه و گاز را نشان می‌دهند [۷۵].

¹ Fuel Saving

² Fuel Energy Saving Ratio

³ Carbon Dioxide Emmission Reduction

در این فصل معادلات الکتروشیمیایی پیل سوختی و ترمودینامیکی پیل سوختی پلیمری، چیلر جذبی، تانک ذخیره حرارتی و مبدل متان به سوخت ارائه شده‌اند. در بخش بررسی عملکرد سیستم نیز روابط مورد نیاز برای راندمان‌های انرژی و انرژی ارائه شده‌اند. همچنین سیستم *CCHP* با سیستم‌های سنتی تامین انرژی مورد مقایسه قرار گرفت، میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت و میزان کاهش آلاینده‌ی دی اکسید کربن نیز آنالیز شده است. در فصل آینده نیز سیستم *CCHP* با دو آرایش مختلف ارائه شده است و عملکرد سیستم‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

فصل چهارم

شبیه‌سازی و ارائه نتایج

۴-۱ مقدمه

در فصل سوم مدلسازی سیکل به منظور تعیین تاثیر پارامترهای پیل سوختی بر عملکرد سیستم صورت گرفت. مدل ارائه شده قابلیت تعیین میزان حرارت و کار تولیدی پیل سوختی و همچنین حرارت جذب شده در اواپراتور چیلر جذبی را داراست. بدین منظور با استفاده از نرم افزار (EES) تحلیل انرژی، انرژی، زیست محیطی و صرفه‌جویی در مصرف سوخت سیستم‌های (CCHP) انجام شده است. در ادامه نیز دو نوع آرایش مختلف از سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما معرفی شده‌اند که از پیل سوختی پلیمری به عنوان محرک اصلی خود بهره برده‌اند. همچنین با تغییر شرایط عملکرد سیستم و تغییر پارامترهای عمل‌کردی پیل سوختی پلیمری و چیلر جذبی تغییرات عملکرد سیستم از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند.

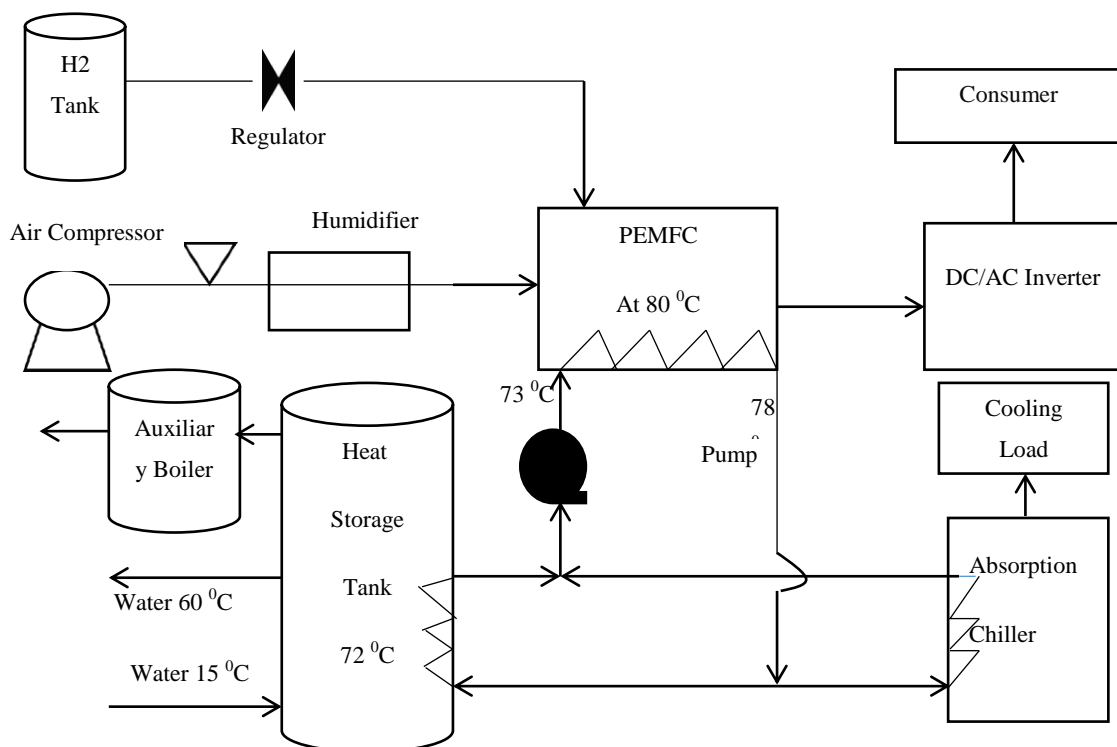
۴-۲ آرایش سیکل

سیستم‌های تولید همزمان با توجه به نوع محرک اولیه خود می‌توانند آرایش‌های مختلفی برای تامین نیاز کاربران خود داشته باشند. در این تحقیق محرک اولیه مورد استفاده پیل سوختی پلیمری است و برای بهره بردن از انرژی اتلافی این محرک اولیه از چیلر جذبی و تانک ذخیره حرارتی استفاده شده است که سیال عامل خنک‌کاری وارد پیل سوختی پلیمری می‌شود که علاوه بر خنک‌کاری پیل خودش تغییر دما داده و قابلیت تبادل این حرارت با یک سیستم بازیافت حرارت اتلافی را خواهد داشت.

۴-۲-۱ آرایش اول

طرح سیستم مورد نظر در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. سیستم تولید همزمان مورد بررسی در این تحقیق شامل پشته پیل سوختی پلیمری، چیلر جذبی تک اثره و تانک ذخیره‌ی حرارتی است. این سیستم توانایی تولید همزمان برق، حرارت و سرما را برای مصارف ساختمانی دارد و از چیلر جذبی لیتیوم بروماید-آب برای تهویه مطبوع و همچنین تانک ذخیره حرارتی برای تامین آب گرم مورد نیاز

بهره می‌برد. همچنین در کنار این سیستم نیز از بویلر کمکی برای مواقعی که سیستم نمی‌تواند حرارت مورد نیاز خود را تامین کند نیز استفاده شده است، اما تحلیل در این تحقیق بر این اساس انجام شده است که سیستم در ظرفیت نامی خود پاسخ‌گوی نیاز الکتریکی و حرارتی ساختمان باشد و بویلر تنها محض اطمینان در سیکل وجود داشته باشد. هیدروژن در تانک هیدروژن در فشار ۱۰ بار موجود است و هیدروژن برای ورود به پیل سوختی از یک اجکتور یا شیر تنظیم فشار عبور می‌کند و به فشار ۲ تا ۳ بار می‌رسد [۱۳]. هوا نیز پس از عبور از تجهیزات نشان داده شده از جمله کمپرسور هوا، مبدل فشار هوا و رطوبت زن وارد پیل سوختی می‌شود. هیدروژن و هوا پس از ورود به پیل سوختی و انجام واکنش الکتروشیمیایی آب، برق و حرارت تولید می‌کنند. آب گرم تولیدی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی، از پیل سوختی خارج و وارد تانک ذخیره حرارتی می‌شود. از طرف دیگر برای



شکل (۴-۱): شماتیک سیکل اول

آن که دمای پیل سوختی افزایش پیدا نکند (زیرا افزایش دمای پیل سوختی پلیمری برای پلیمر آن مضر است)، پیل سوختی نیاز به خنک کاری دارد و برای خنک کاری پیل سوختی از یک خط آب ۷۳ درجه سلسیوس استفاده شده است زیرا اگر اختلاف دمای سیال خنک کاری پیل سوختی با خود پیل زیاد باشد پیل از لحاظ توزیع دمایی دچار مشکل می شود [۱۴]. سیال عامل خنک کاری پیل پس از عبور از پیل و دریافت گرمای آن به دو انشعاب تقسیم می شود که یک قسمت از آن به سمت تانک ذخیره‌ی حرارتی رفته و قسمت دیگر آن نیز به سمت ژنراتور چیلر جذبی می رود. در این تحقیق فرض شده است که آب خروجی از پیل به دو قسمت مساوی تقسیم شده است. آب داغی که وارد تانک ذخیره حرارتی می شود می تواند نیاز گرمایشی ساختمان را تامین کند اما برای اطمینان بویلر کمکی از نوع آب داغ لحظه‌ای نیز برای مواقعی که مشکل کمبود انرژی حرارتی وجود دارد، استفاده شده است. ظرفیت منبع ذخیره حرارتی ۲ متر مکعب و آب سرد در دمای ۱۵ درجه سلسیوس وارد تانک شده و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس نیز تانک را ترک می کند. از طرف دیگر در فصل تابستان برای تامین سرمایش مورد نیاز ساختمان از یک چیلر جذبی تک اثره که دمای ژنراتور آن ۷۲ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است استفاده می شود. قسمت دوم آب گرم خروجی از پیل وارد ژنراتور چیلر جذبی می شود تا انرژی حرارتی خود را از دست دهد و به دمای ۷۳ درجه سلسیوس برسد و با این کار چیلر جذبی می تواند سرمایش مورد نیاز برای تهویه مطبوع ساختمان را فراهم کند. در پایان نیز این دو خط آب باز با هم ترکیب شده و با دمای ۷۳ درجه سلسیوس وارد پیل سوختی می شوند تا خنک کاری پیل را انجام دهند و این سیکل تکرار می گردد. برق تولیدی توسط پیل سوختی نیز به مبدل جریان مستقیم به متناوب وارد می شود تا برای مصرف کننده قابل استفاده باشد. برای مدل سازی سیکل فرضیاتی در نظر گرفته شده است که این فرضیات عبارتند از:

- سیستم به حالت پایا برسد [۱۵-۱۹].

- سوخت هیدروژن و اکسایند هوی مرطوب است، بخار موثر آند ۵۰٪ بخار اشباع است در حالی که بخار موثر کاتد ۱۰۰٪ است [۱۵-۱۹].
- محصولات واکنش پیل سوختی پلیمری در فاز مایع قرار دارند [۱۵-۱۹].
- واکنش‌های شیمیایی سیستم به حالت تعادل برسند [۱۵-۱۹].
- هوا شامل ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن است [۱۵].
- دمای کاری پیل ۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار کاری آن ۳ بار است [۱۵].
- فرض شده است که عایق‌بندی پیل سوختی به‌گونه‌ای است که حرارتی را که پیل به محیط دفع می‌کند قابل صرف‌نظر است و آب سرد عبوری تمام انرژی حرارتی پیل را دریافت کند [۱۵].
- ضرایب گرمای ویژه ثابت در نظر گرفته شده است [۱۵].
- آب سرد عبوری تمام انرژی حرارتی پیل را دریافت کند [۱۵].

۴-۲-۱-۱ نتایج و بحث آرایش اول

سیستم CCHP بر پایه‌ی پیل سوختی پلیمری ارائه شده در این تحقیق با استفاده از معادلات الکتروشیمی و ترمودینامیک مدل‌سازی شده است. در مرحله‌ی اول معادلات پیل سوختی پلیمری در نرم‌افزار EES نوشته؛ تحلیل انرژی و انرژی پیل سوختی انجام شده است. سپس با داشتن حرارت قابل استفاده در پیل سوختی مدل‌سازی انرژی و انرژی چیلر جذبی با کمک نرم‌افزار EES، (به خاطر وجود کتابخانه‌های قوی شامل خواص ترمودینامیکی مواد) انجام شده است

فرضیات اولیه به عنوان ورودی برای مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری طبق مراجع [۱۳، ۱۵] در جدول (۴-۱) آمده است؛ همچنین پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی تک اثره در جدول (۴-۲)

مشخص شده است [۲۶]. نتایج ناشی از حل مدل پیل سوختی به همراه اعتبار سنجی آن در جدول (۳-۴) ارائه شده است. نتایج ناشی از مدل سازی چیلر جذبی نیز در جدول (۴-۴) قابل مشاهده است. در جدول (۵-۴) نیز اطلاعات ناشی از مدل سازی کلی چیلر جذبی ارائه شده است.

جدول (۴-۱): پارامترهای ورودی برای مدل سازی انرژی و انرژی پیل سوختی پلیمری [۱۳،۱۵]

پارامتر ورودی	مقدار	واحد
تعداد الکترون منتقل شده	2	(-)
ضریب فاراده	96485	(C mol ⁻¹)
دمای محیط	293.15	(K)
فشار محیط	1	(bar)
تعداد سلول در استک پیل	420	(-)
مساحت هر سلول	232	(cm ²)
فشار کاری پیل	3	(bar)
دمای کاری	80	(°C)
چگالی جریان کاری	0.6	(Acm ⁻²)
چگالی جریان حدی	1.5	(Acm ⁻²)
ارزش حرارتی بالای هیدروژن	285550	(Jmol ⁻¹)
نسبت استوکیومتری هیدروژن	1.2	(-)
نسبت استوکیومتری هوا	2	(-)
ظرفیت حرارتی ویژه هیدروژن	28.86	(J mol ⁻¹ K ⁻¹)
ظرفیت حرارتی ویژه اکسیژن	29.72	(J mol ⁻¹ K ⁻¹)
ظرفیت حرارتی ویژه نیتروژن	28.39	(J mol ⁻¹ K ⁻¹)
ظرفیت حرارتی ویژه آب	75.95	(J mol ⁻¹ K ⁻¹)
چگالی تبادل جریان	0.00000012	(Acm ⁻²)

جدول (۴-۲): پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی

پارامتر ورودی	مقدار	واحد
فشار بالای سیکل جذبی [31]	5	(kPa)
فشار پایین سیکل جذبی [31]	0.9	(kPa)
دمای ژنراتور سیکل جذبی [32]	72	(°C)
دبی جرمی ورودی به پمپ	0.3	(kg s ⁻¹)
حرارت ورودی به ژنراتور سیکل جذبی	19.56	(kW)

همانطور که از نتایج جدول (۴-۳) مشخص است، مقادیر بدست آمده ناشی از مدل‌سازی پیل دارای تطابق نسبتاً خوبی با مقادیر بدست آمده توسط مرجع [۱۳] می‌باشد و راندمان‌ها نیز با توجه به بازه راندمانی که برای پیل سوختی پلیمری تعریف می‌شود [۱۴] اعداد مناسب و منطقی هستند. نتایج ناشی از مدل‌سازی چیلر جذبی در EES نیز در جدول (۴-۴) و (۴-۵) بطور کامل ارائه شده است. در جدول (۴-۴) اطلاعات هر نقطه از سیکل جذبی به همراه انتروپی محلول با توجه به شماره گذاری شکل (۳-۳) قابل مشاهده می‌باشد و همانطور که از این نتایج مشخص است دمای اواپراتور با توجه به مرجع [۳۱] مقدار مناسبی بدست آمده است. در جدول (۴-۶) نیز اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل زیست محیطی و صرفه‌جویی در مصرف سوخت سیستم تولید همزمان ارائه شده در این پایان‌نامه برای مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید انرژی آورده شده است.

نتایج ناشی از مدل‌سازی سیستم از چهار دیدگاه مختلف انرژی، انرژی، درصد کاهش مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌گی دی‌اکسید کربن نیز در جدول (۴-۷) قابل مشاهده است و همانطور که از این نتایج مشخص است سیستم پیشنهاد شده از نظر هر چهار دیدگاه مناسب و قابل توجیه است.

جدول (۳-۴): نتایج ناشی از مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری

خروجی‌های ناشی از شبیه‌سازی	مقدار شبیه‌سازی	نتایج مرجع [13]	درصد خطای [%]	واحد
ولتاژ پیل سوختی	0.66	0.6787	2	(V)
کار پیل سوختی	38.63	-	-	(kW)
حرارت پیل	39.17	-	-	(kW)
افت ولتاژ اهمی	0.0335	0.0341	1.7	(V)
افت ولتاژ غلظتی	0.0036	0.00365	1.3	(V)
افت ولتاژ فعال‌سازی	0.5081	0.521	3.7	(V)
دبی مولی هیدروژن مصرفی	0.36	-	-	(mol s ⁻¹)
دبی مولی اکسیژن مصرفی	0.3	-	-	(mol s ⁻¹)
راندمان انرژی پیل سوختی	37.21	-	-	(%)
راندمان انرژی پیل سوختی	45	-	-	(%)
بازگشت ناپذیری تولیدی در پیل سوختی	47.21	-	-	(kW)

در شکل (۲-۴) نیز فلوجارت کاری برای مدل‌سازی و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکردهای مختلف سیستم نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق تاثیر پارامترهای مختلفی بر مسائل انرژی، انرژی، *FESR* و *CDER* بررسی شده‌اند فلوجارت شکل (۲-۴) بطور کلی می‌باشد و $P(i)$ می‌تواند هر کدام از متغیرهای نمودارهای آینده باشد. اما برای روشن‌تر شدن مفهوم آن مثالی بیان خواهد شد، مثلا بررسی تاثیر فشار بالای سیکل جذبی بر چهار دیدگاه، برای بررسی این

¹ Parameter i

جدول (۴-۴) نتایج ناشی از مدل سازی ترمودینامیکی چیلر جذبی

نقطه سیکل جذبی	دما [°C]	دبی جرمی [kg s ⁻¹]	فشار [kPa]	انتالپی [kJ kg ⁻¹]	انترپی [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
1	40.3	0.3000	0.900	107.4	0.2405
2	40.3	0.3000	5.000	107.4	0.2405
3	62.5	0.3000	5.000	151.2	0.373
4	72.0	0.2997	5.000	170.3	0.4274
5	49.8	0.2997	5.000	126.4	0.2979
6	41.2	0.2997	0.900	126.4	0.2452
7	71.9	0.0003	5.000	47457.7	155.3
8	32.9	0.0003	5.000	2481.1	151.2
9	5.4	0.0003	0.900	2481.1	162.4
10	5.4	0.0003	0.900	45227.8	162.4

جدول (۴-۵): نتایج عملکرد چیلر جذبی

پارامتر	مقدار	واحد
حرارت ورودی به ژنراتور	19.56	(kW)
حرارت دریافتی از اواپراتور	12.53	(kW)
حرارت خروجی از جذب کننده	18.91	(kW)
حرارت خروجی از کندانسور	13.15	(kW)
ضریب عملکرد چیلر	0.64	(-)
بازگشت ناپذیری تولیدی	5.95	(kW)

جدول (۴-۶): پارامترهای ورودی برای تحلیل عملکرد کل سیکل

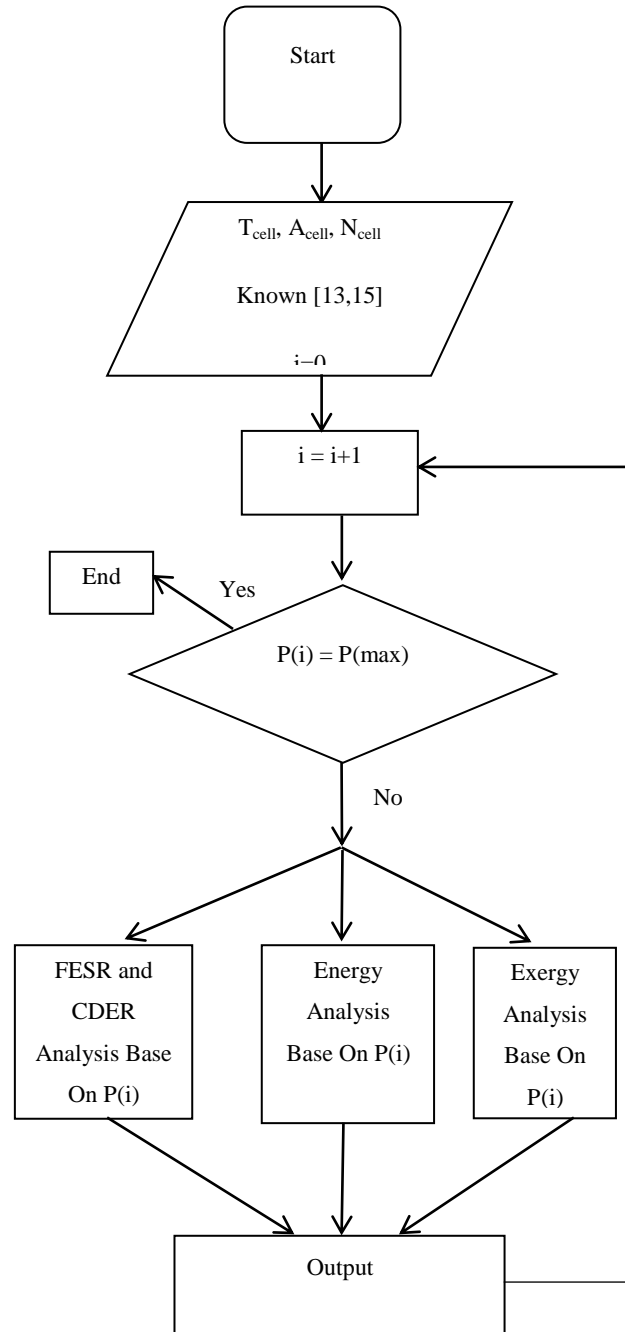
پارامتر	مقدار	واحد
T_{cool} [13]	9	($^{\circ}C$)
T_{heat} [13]	43	($^{\circ}C$)
COP_e [29]	3	(-)
η_b [29]	0.8	(-)
η_{conv} [33]	0.3	(-)
μ_f [34]	220	($gr kWh^{-1}$)
μ_e [33]	836	($gr kWh^{-1}$)

جدول (۴-۷): نتایج ناشی از شبیه‌سازی کل سیکل

پارامتر	مقدار	واحد
راندمان انرژی در حالت CHP	55.9	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایش	49.1	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CCHP	68	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CHP	46.3	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایش	44.2	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CCHP	45.5	(%)
درصد کاهش مصرف سوخت	34	(%)
درصد کاهش آلاینده‌گی	25	(%)

تأثیر در ابتدا فشار در یک بازه از یک مقدار اولیه تا مقدار حداکثر به تعداد دلخواه تقسیم بندی می‌شود و سپس هر قسمت از فشار به عنوان $P(i)$ به کد نوشته شده داده می‌شود و پاسخ‌های $P(i)$ ذخیره می‌گردد. و سپس i به $i+1$ تغییر پیدا می‌کند و این حلقه تا جایی تکرار می‌شود که $P(i)$ همان

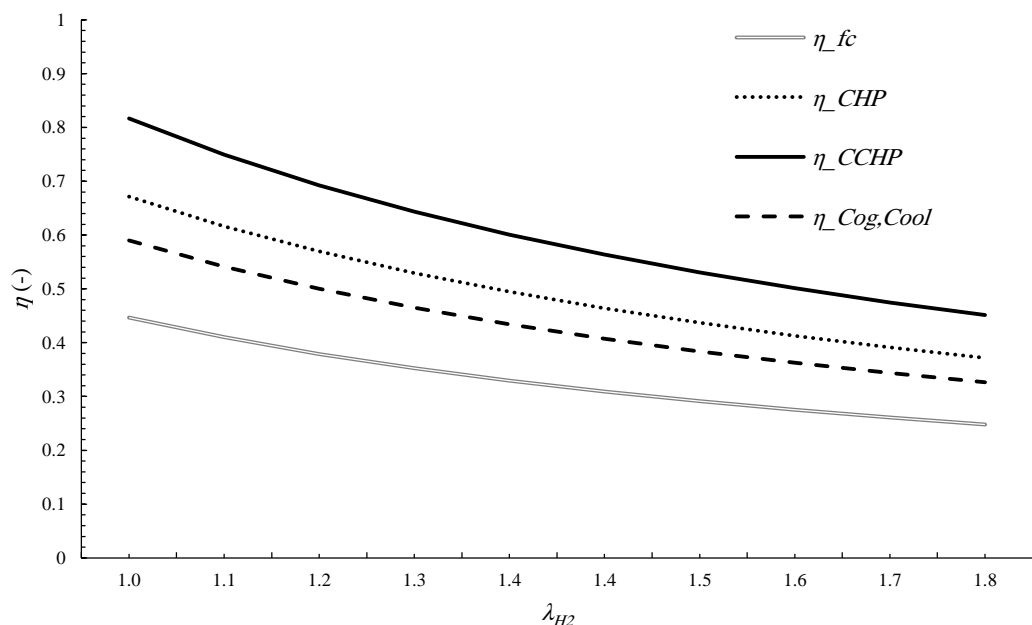
مقدار حداکثر فشار بالای سیکل جذبی بشود و وقتی پارامتر \dot{m} به حداکثر خود برسد محاسبات متوقف می شود.



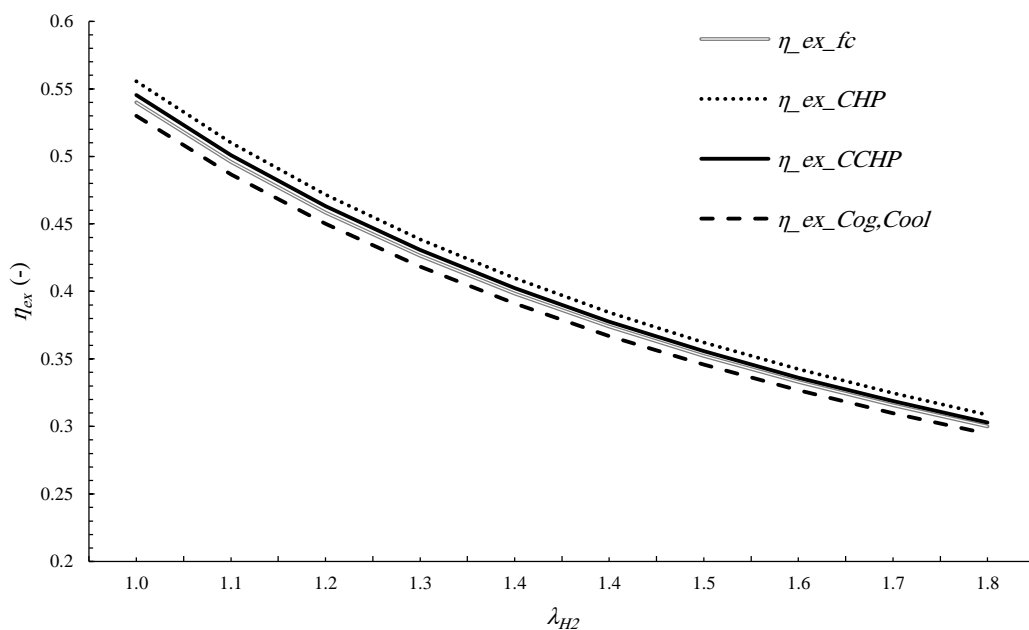
شکل (۴-۲) فلوچارت مدل سازی سیستم

در شکل (۳-۴) به تاثیر ضریب استوکیومتری هیدروژن در واکنش الکتروشیمیایی بر راندمان‌های انرژی سیستم پرداخته شده است. همانطور که از شکل (۳-۴) مشخص است با افزایش ضریب استوکیومتری هیدروژن راندمان به دلیل بالا رفتن مصرف سوخت، کاهش می‌یابد؛ می‌توان به این نتیجه رسید که پیل سوختی پلیمری باید طوری ساخته شود که ضریب استوکیومتری هیدروژن پایین باشد تا راندمان سیستم افزایش یابد.

در شکل (۴-۴) نیز تاثیر ضریب استوکیومتری هیدروژن بر راندمان‌های انرژی سیستم نشان داده شده است و همانطور که مشخص است مشابه همان شکل (۳-۴) به خاطر بالا رفتن مصرف سوخت با افزایش ضریب استوکیومتری راندمان‌های انرژی کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که نحوه-ی ساخت این پکیج بسیار مهم است و اگر پیل سوختی پکیج به گونه‌ای ساخته شود که میزان هیدروژن اضافی مورد نیاز پیل کمتر باشد؛ هم راندمان انرژی و هم راندمان انرژی به طور چشم-گیری افزایش می‌یابد.



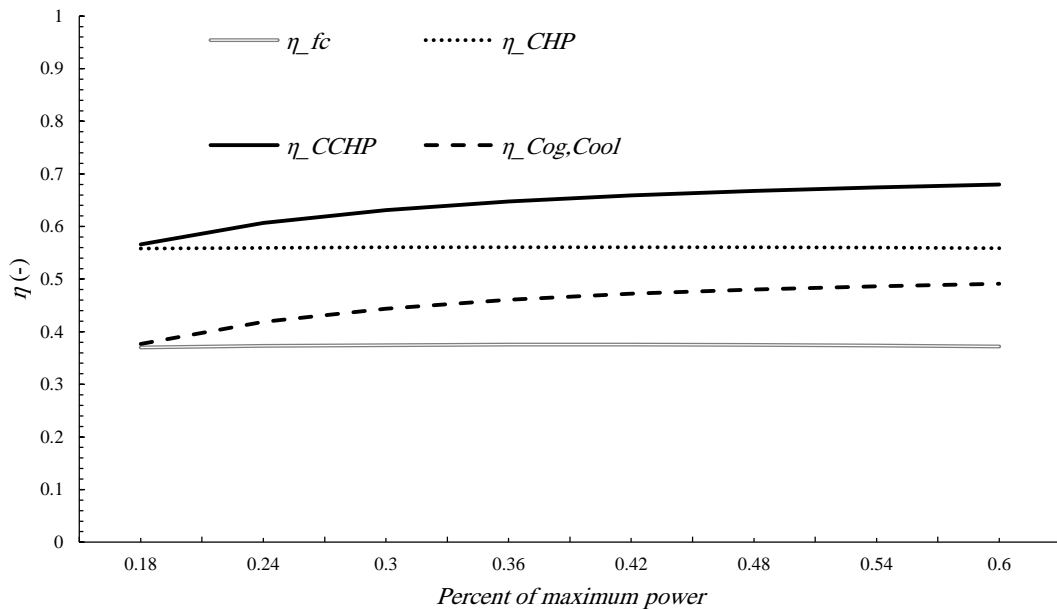
شکل (۳-۴): تاثیر ضریب استوکیومتری مصرف هیدروژن بر راندمان‌های انرژی سیستم



شکل (۴-۴): تاثیر ضریب مصرف هیدروژن بر راندمان‌های انرژی سیستم

پیل سوختی ارائه شده در این پژوهش دارای حداکثر توان الکتریکی 38.63 کیلووات است، اما بسته به نیاز مصرف کننده یا بعضی از شرایط دیگر، پیل در بعضی از موارد در توانی کمتر از توان نامی خود کار می‌کند. در این مقاله نسبت توان الکتریکی تولیدی به حداکثر توانی که پیل می‌تواند تولید کند؛ درصد از حداکثر توان نامیده می‌شود. در شکل (۴-۵) تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی تولیدی بر راندمان‌های انرژی سیستم، در چهار حالت مختلف قابل مشاهده است. همانطور که از شکل (۴-۵) مشخص است با افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی راندمان‌های انرژی پیل سوختی پلیمری و حالت تولید دوگانه برق و حرارت تقریباً ثابت مانده است، اما وقتی حرارت تولیدی در پیل سوختی به چیلر جذبی داده می‌شود، یعنی سیستم در حالت CCHP و تولید برق و سرمایش قرار می‌گیرد افزایش راندمان همزمان با افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی قابل مشاهده است، چون با افزایش توان پیل سوختی، حرارت تولیدی در آن نیز افزایش می‌یابد، لذا ضریب عملکرد نیز با افزایش حرارت

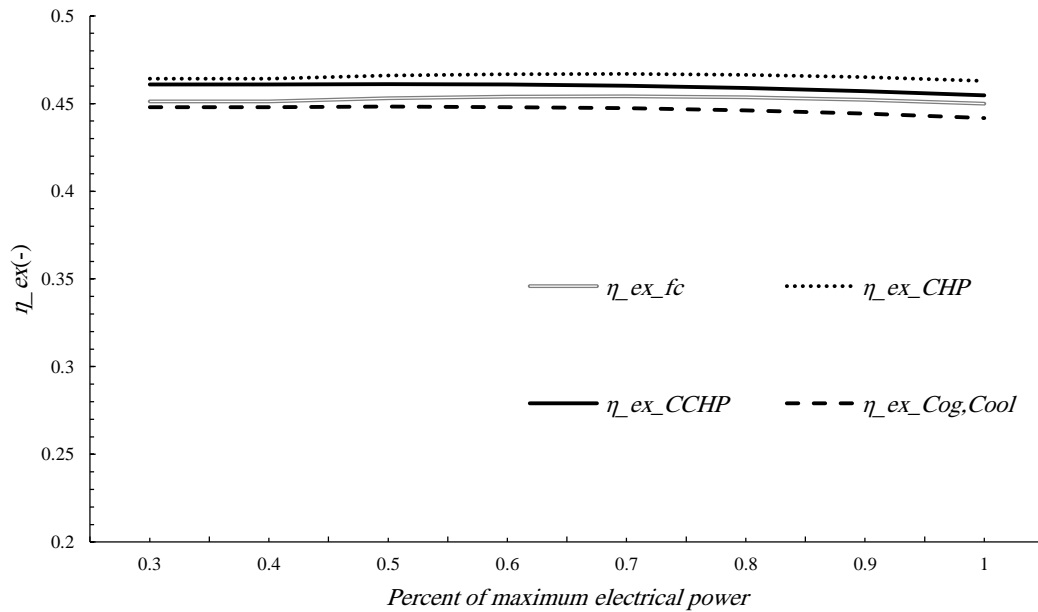
ورودی به ژنراتور چیلر افزایش می‌یابد و در نتیجه سیستم در حالتی که سرمایه‌ش تولید کند راندمان بیشتری خواهد داشت.



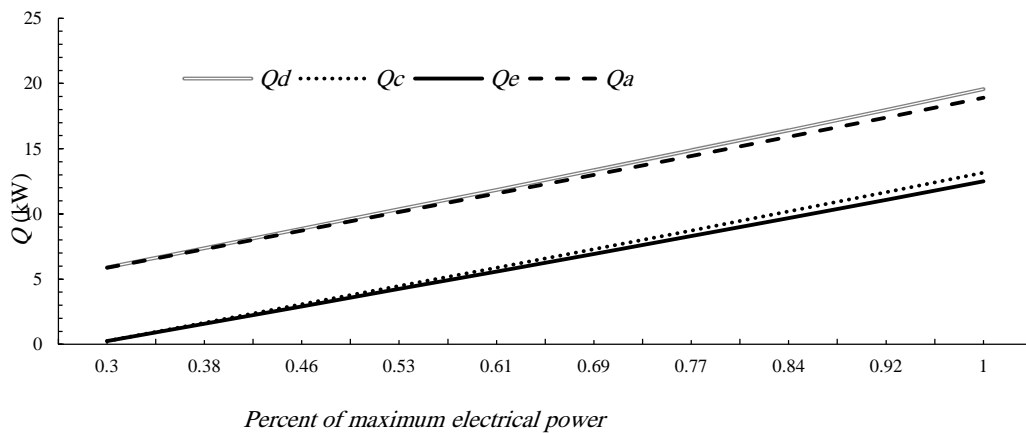
شکل (۴-۵): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان‌های انرژی سیستم

در شکل (۴-۶) به تاثیر افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان‌های انرژی سیستم در چهار حالت مختلف پرداخته شده است. همانطور که از شکل (۴-۶) مشخص است با افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی؛ راندمان انرژی تغییر چندانی ندارد، علت عدم تغییرات راندمان انرژی نیز به تعریف انرژی باز می‌گردد؛ زیرا در انرژی مسئله‌ی مهم کار تولیدی است و حرارت قابل استفاده تاثیر چندانی در راندمان انرژی نخواهد داشت لذا چون با افزایش کار تولیدی؛ انرژی ورودی به سیستم نیز تقریباً با شیب ثابتی افزایش می‌یابد، نسبت کار خروجی به انرژی ورودی ثابت می‌ماند و در نتیجه نمودار تغییرات درصد از حداکثر توان الکتریکی تولیدی با راندمان‌های انرژی بصورت خط افقی و نزدیک به همان راندمان انرژی پیل سوختی باقی مانده است.

در شکل (۷-۴) تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر حرارت‌های سیکل جذبی نشان داده شده است. و همانطور که مشاهده می‌شود با توجه به افزایش درصد از حداکثر بار الکتریکی تولیدی، حرارت‌های تبادل شده در چیلر به خاطر افزایش حرارت تولیدی در پیل سوختی پلیمری رشد می‌کند.

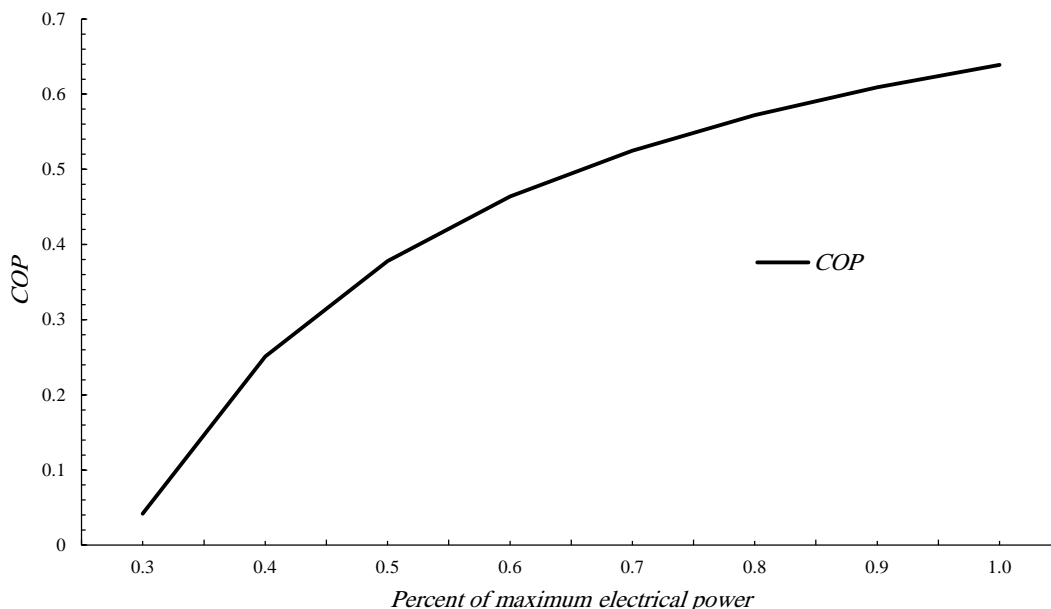


شکل (۶-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان‌های اگزرژی سیستم



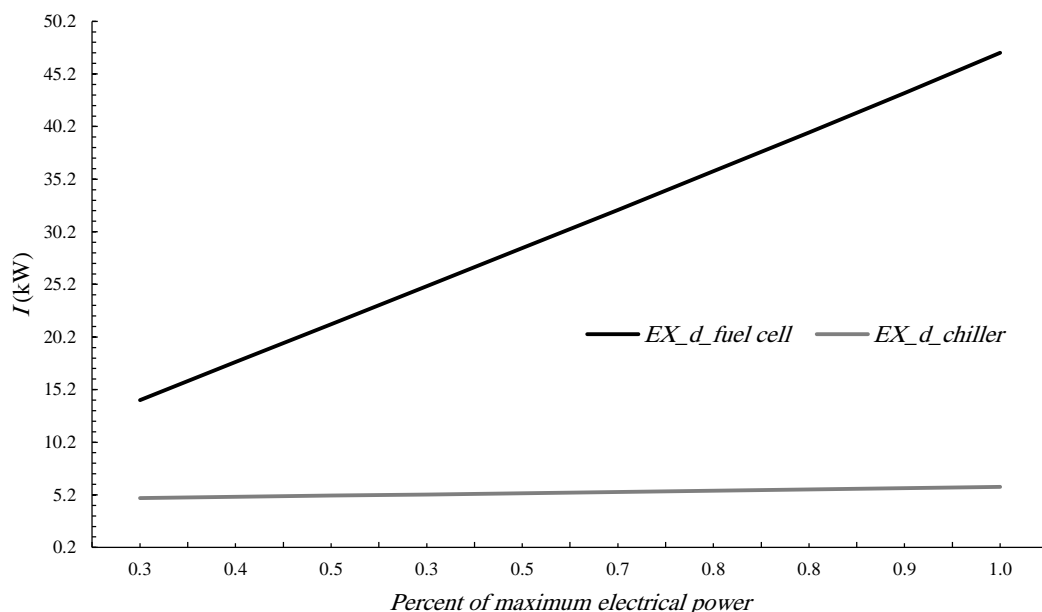
شکل (۷-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر حرارت‌های تولیدی سیستم

در شکل (۴-۸) تاثیر درصد از حداکثر بار الکتریکی بر ضریب عملکرد چیلر جذبی سیکل نشان داده شده است. و با توجه به افزایش حرارت ورودی به ژنراتور چیلر جذبی؛ ضریب عملکرد چیلر به خاطر افزایش حرارت ورودی به ژنراتور چیلر افزایش می‌یابد.



شکل (۴-۸): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر ضریب عملکرد چیلر جذبی

در شکل (۴-۹) به تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر بازگشت‌ناپذیری در پیل سوختی و چیلر جذبی پرداخته شده است. همانطور که از نمودار (۴-۹) پیداست بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل سوختی پلیمری به شدت به توانی که پیل تولید می‌کند وابسته است اما در چیلر جذبی این چنین نیست، علت این امر در این نکته نهفته است که پیل سوختی وسیله‌ای برای تولید کار است اما چیلر جذبی وسیله‌ای برای تبادل حرارت لذا کاملاً منطقی به نظر می‌رسد که با توجه به وابستگی شدید تعریف اگزرژی به کار تولیدی تغییرات بازگشت‌ناپذیری در پیل سوختی بسیار زیاد اما در چیلر جذبی بسیار کم باشد.

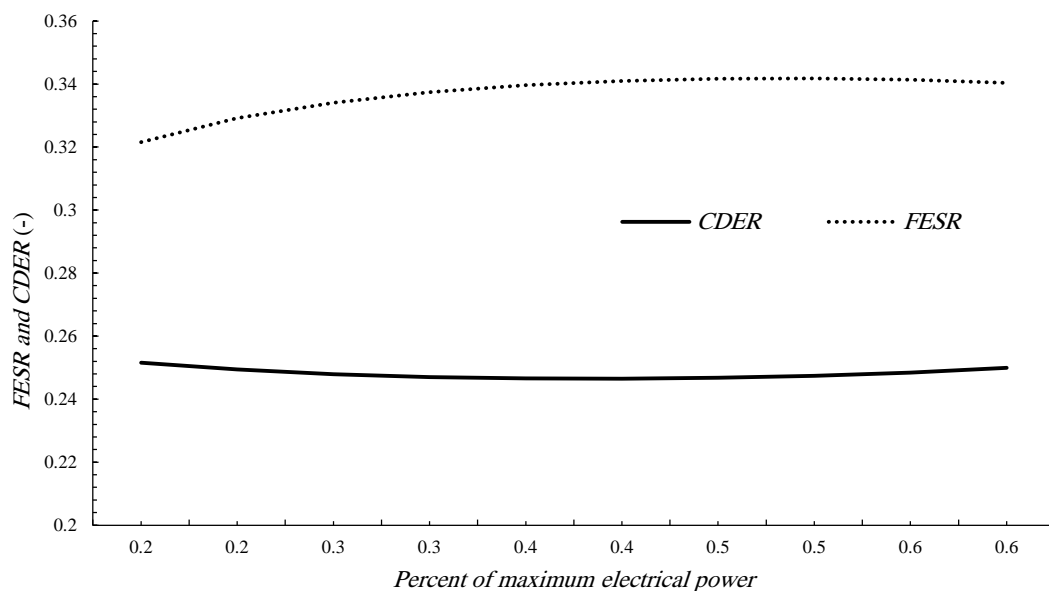


شکل (۴-۹): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر بازگشت ناپذیری‌های پیل سوختی و چیلر جذبی

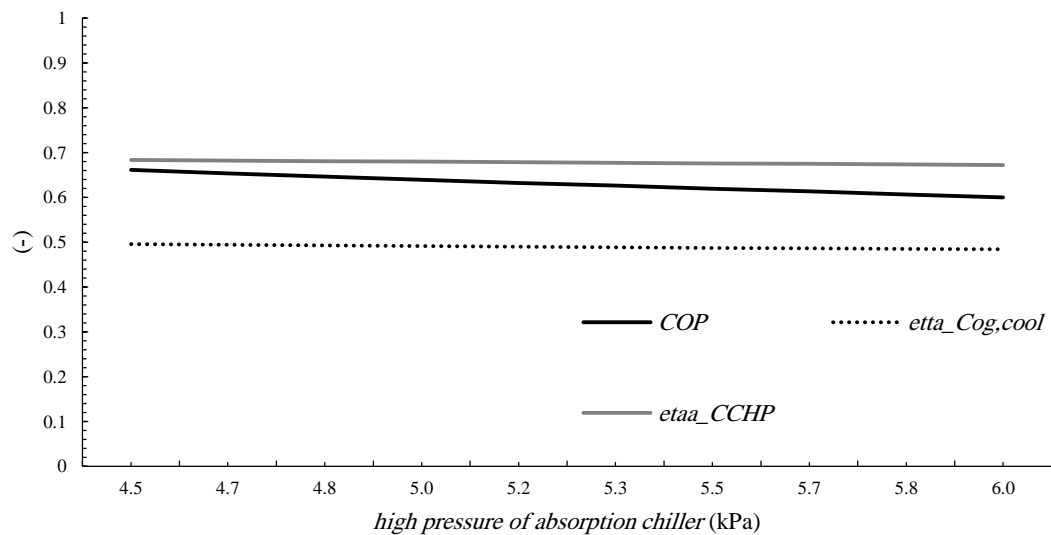
در شکل (۴-۱۰) تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی قابل مشاهده است. همانطور که از این نمودار پیداست با افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی میزان صرفه جویی مصرف سوخت افزایش می‌یابد اما میزان کاهش آلاینده‌گی تقریباً ثابت می‌ماند و علت افزایش میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت تفاوت راندمان‌های سیستم‌های سنتی با پیل سوختی است که چون راندمان پیل سوختی بیشتر است لذا با افزایش کار خروجی از پیل میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت در مقایسه با سیستم‌های سنتی نیز بیشتر می‌گردد.

در شکل (۴-۱۱) تاثیر فشار بالای سیکل جذبی بر ضریب عملکرد، راندمان‌های تولید سه‌گانه و تولید دوگانه‌ی برق و سرمایش نشان داده شده است و همانطور که از شکل نمودار مشخص است با افزایش فشار بالای سیکل راندمان‌ها بصورت نامحسوس کاهش می‌یابند اما ضریب عملکرد چیلر جذبی کمی محسوس‌تر کاهش یافته است، در مجموع چون بحث سرمایش در تعریف راندمان کل سیکل فقط یک

ترم از صورت کسر است تغییر ضریب عملکرد چیلر آن هم از مرتبه‌ی عددی صدم تاثیر چندانی بر راندمان کل سیکل نمی‌گذارد.



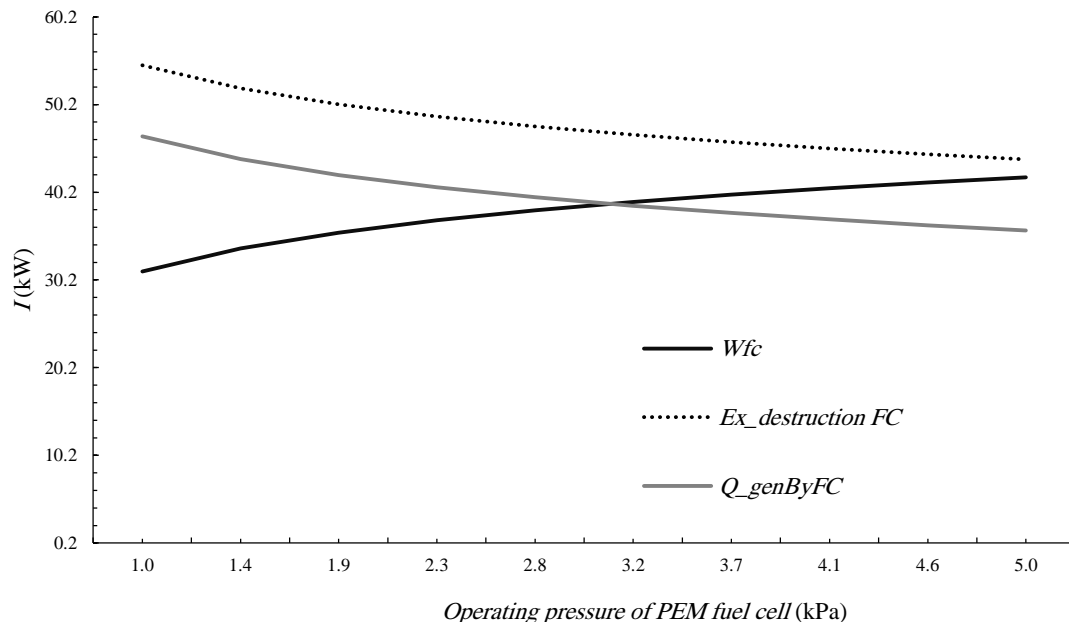
شکل (۴-۱۰): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی



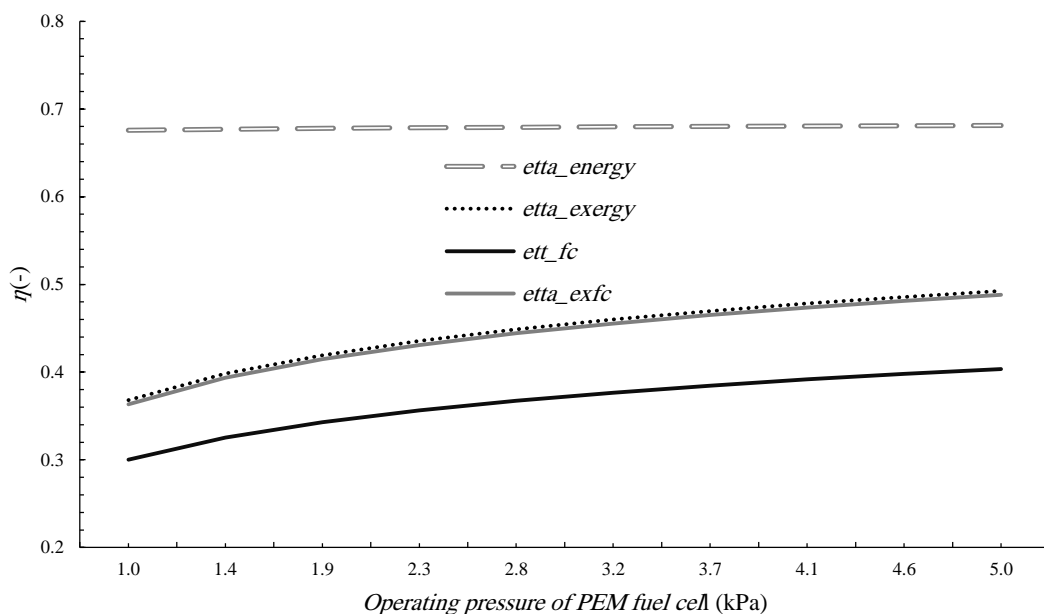
شکل (۴-۱۱): تاثیر فشار بالای چیلر جذبی بر عملکردهای سیستم

در شکل (۱۲-۴) تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر کار، حرارت و بازگشت ناپذیری‌های پیل سوختی نشان داده شده است. همانطور که از این شکل پیداست با افزایش فشار کاری پیل سوختی، افزایش کار خروجی و کاهش حرارت تولیدی رخ می‌دهد، این حالت از لحاظ انرژی یکی از حالت‌های ایده‌آل می‌باشد و در نتیجه چون با افزایش فشار کاری پیل سوختی حرارت تولیدی کاهش و کار تولیدی افزایش می‌یابد، سیستم از انرژی ورودی خود استفاده‌ی بهتری می‌کند و نرخ بازگشت ناپذیری پیل سوختی کاهش می‌یابد.

در شکل (۱۳-۴) تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر راندمان‌های انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۱۳-۴) مشخص است با افزایش فشار کاری پیل سوختی پلیمری چون کار تولید طبق نمودار (۱۲-۴) افزایش می‌یابد راندمان‌های انرژی و انرژی نیز افزایش می‌یابند.



شکل (۱۲-۴): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر کار و حرارت تولیدی سیستم

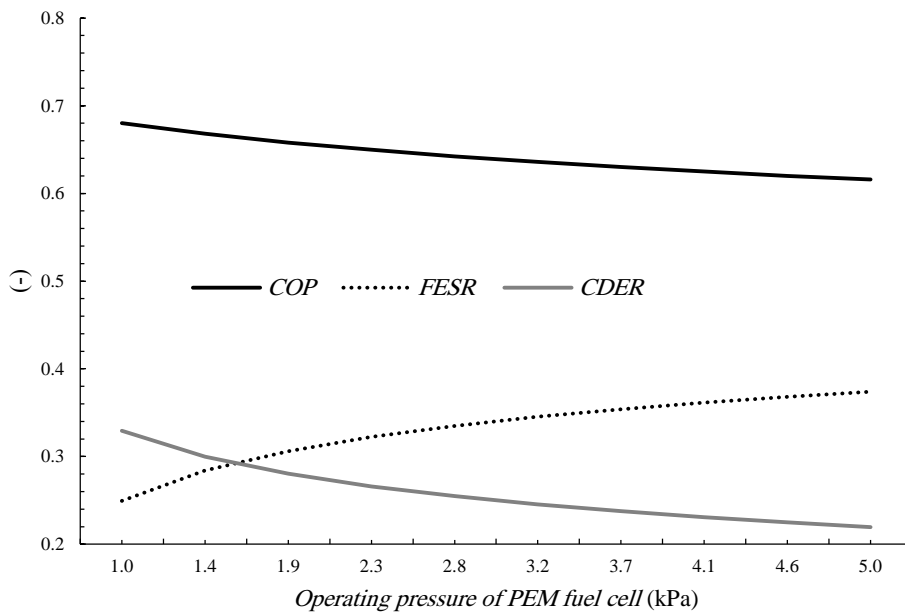


شکل (۴-۱۳): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر راندمان‌ها

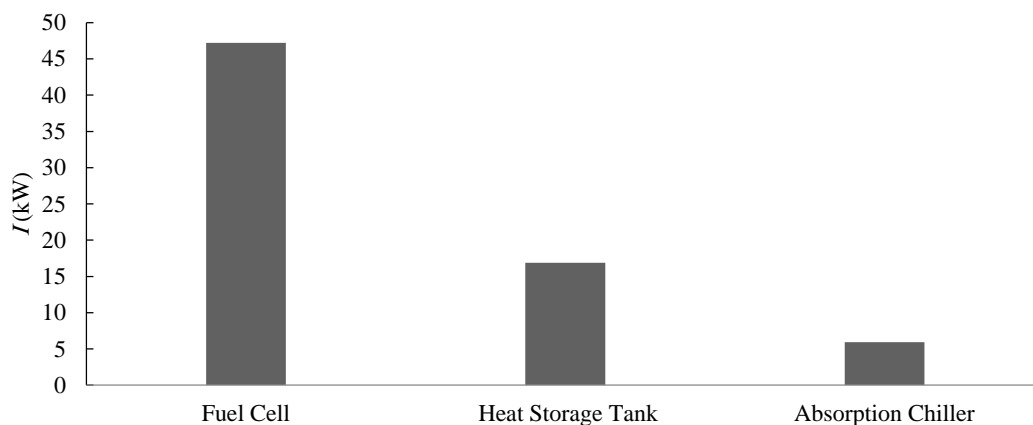
در شکل (۴-۱۴) نیز تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر ضریب عملکرد چیلر جذبی، درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی مورد بررسی قرار گرفته است. در نمودار (۴-۱۴) چون با افزایش فشار کاری پیل حرارت تولیدی در پیل سوختی و در نتیجه حرارت ورودی به چیلر جذبی کاهش می‌یابد، ضریب عملکرد چیلر جذبی نیز کم شده است. همچنین با توجه به بالا رفتن راندمان سیستم در اثر افزایش فشار کاری پیل سوختی، سیستم در مقایسه با سیستم‌های سنتی مصرف سوخت کمتری دارد، در نتیجه درصد کاهش مصرف سوخت نیز افزایش یافته است. از طرف دیگر با افزایش فشار کاری پیل سوختی چون کار خروجی از پیل سوختی افزایش و حرارت تولیدی کاهش می‌یابد لذا سیستم سنتی که قرار است با سیستم حاضر مقایسه شود باید حرارت کمتری تولید کند.

در شکل (۴-۱۵) نیز میزان بازگشت ناپذیری تولیدی در هر جز سیکل از جمله پیل سوختی پلیمری، چیلر جذبی و مخزن ذخیره حرارتی نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است،

بیشترین بازگشت ناپذیری تولیدی در سیکل مربوط به پیل سوختی است. زیرا بیشترین حرارت تولیدی در پیل سوختی رخ می‌دهد.



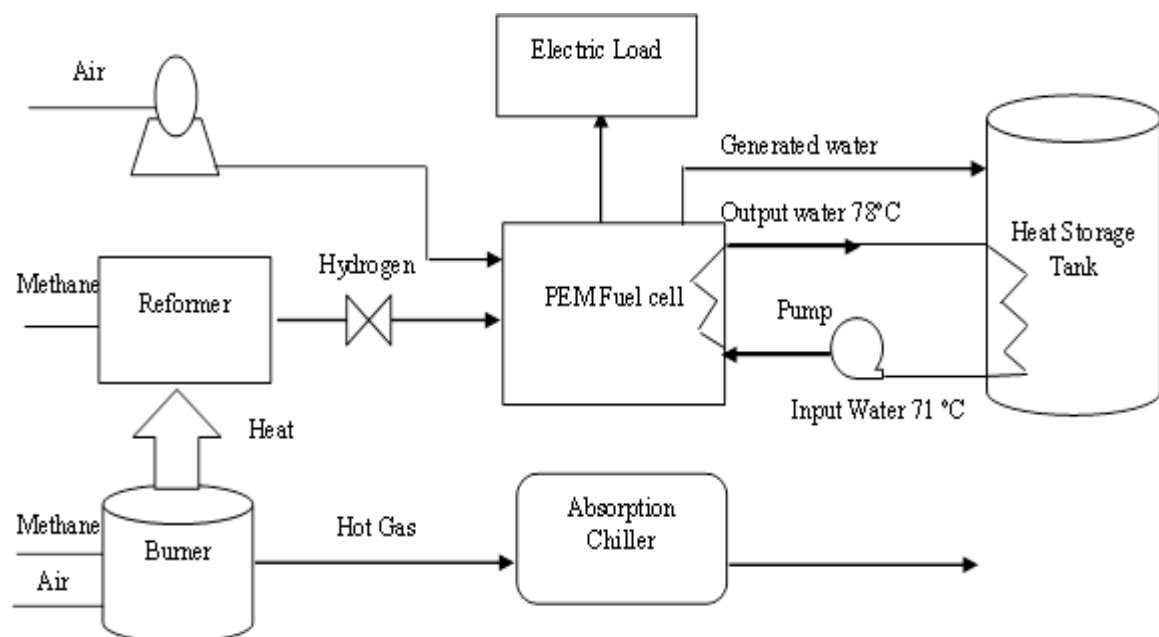
شکل (۴-۱۴): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر درصد کاهش مصرف سوخت، درصد کاهش تولید آلاینده‌گی و ضریب عملکرد چیلر جذبی



شکل (۴-۱۵): بازگشت ناپذیری اجزای سیستم

۴-۲-۲ آرایش دوم

طرح سیستم موردنظر در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است. در این سیستم، گاز متان از خط اصلی به دو قسمت تقسیم می‌شود که یک خط آن وارد مشعل شده تا گرمای موردنیاز برای انجام واکنش و تبدیل متان به هیدروژن تأمین گردد، بدین منظور گاز متان ورودی به مشعل با هوا واکنش می‌دهد و خط دیگر گاز متان نیز وارد ریفرمر می‌شود، سپس این گاز در ریفرمر به هیدروژن تبدیل شده و هیدروژن خروجی به‌عنوان سوخت پیل سوختی قابل‌استفاده است. هیدروژن تولیدی وارد پیل سوختی پلیمری می‌شود و با هوایی که توسط کمپرسور تأمین می‌شود واکنش می‌دهد و پس از انجام واکنش الکتروشیمیایی در پیل مقداری کار (به‌صورت الکتریسیته) و حرارت تولید می‌شود که کار تولیدی به مصرف‌کننده داده می‌شود، اما حرارت تولیدی در پیل سوختی باید توسط یک سیستم خنک‌کاری دفع شود تا از داغی پیل سوختی جلوگیری شود لذا برای خنک‌کاری پیل یک خط آب ۷۳ درجه



شکل (۴-۱۶): شماتیک آرایش دوم سیکل

سلسیوس وارد پیل می‌شود تا گرمای تولیدی در پیل سوختی را دریافت کرده و علاوه بر خنک‌سازی پیل، به مخزن ذخیره حرارتی رفته و آب گرم مصرفی را تامین می‌کند. در نهایت برای تبرید، گازهای داغ خروجی از مشعل به چیلر جذبی داده خواهد شد تا انرژی حرارتی مورد نیاز ژنراتور چیلر جذبی تامین و تبرید انجام گیرد.

۴-۲-۱ نتایج و بحث آرایش دوم

مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری در این قسمت مشابه آرایش اول است ولی مدل‌سازی ریفورمر متان و بویلر آن دارای نوآوری می‌باشد. در بویلر ریفورمرهای سنتی دبی مولی گاز ورودی و حرارت تولیدی در بویلر معلوم است اما در این پایان نامه دمای گازهای خروجی و حرارت مورد نیاز ریفورمر معلوم است. دمای گازهای خروجی از بویلر در این پایان نامه، ۱۰۰۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

نتایج ناشی از مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری، چیلر جذبی و مدل‌سازی کل سیکل به ترتیب در جداول (۴-۸)، (۴-۹) و (۴-۱۰) آمده است. و همان‌طور که از نتایج جدول (۴-۸) مشخص است، در این سیکل راندمان انرژی و انرژی پیل سوختی پایین است این پایین بودن راندمان به دلیل بالا بودن ارزش حرارتی و انرژی متان می‌باشد و متعاقباً بازگشت ناپذیری تولیدی در پیل سوختی نیز بسیار بالا است و در کل می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از متان به عنوان سوخت ورودی پیل سوختی پلیمری به تنهایی انتخاب چندان مناسبی نمی‌باشد.

در شکل (۴-۱۷) تاثیر ضریب استوکیومتری هیدروژن بر راندمان‌های مختلف سیستم نمایش داده شده است همان‌طور که از شکل (۴-۱۷) مشخص است با افزایش ضریب استوکیومتری هیدروژن راندمان به دلیل بالا رفتن مصرف سوخت، کاهش می‌یابد؛ می‌توان به این نتیجه رسید که پیل سوختی

جدول (۴-۸): نتایج ناشی از مدل سازی پیل سوختی آرایش دوم

خروجی های ناشی از شبیه سازی	مقدار شبیه سازی	نتایج مرجع [13]	درصد خطای [%]	واحد
ولتاژ پیل سوختی	0.66	0.6787	2	(V)
کار پیل سوختی	38.63	-	-	(kW)
حرارت پیل	39.17	-	-	(kW)
افت ولتاژ اهمی	0.0335	0.0341	1.7	(V)
افت ولتاژ غلظتی	0.0036	0.00365	1.3	(V)
افت ولتاژ فعال سازی	0.5081	0.521	3.7	(V)
دبی مولی متان مصرفی	0.1477	-	-	(mol s ⁻¹)
دبی مولی اکسیژن مصرفی	0.3	-	-	(mol s ⁻¹)
راندمان انرژی پیل سوختی	32.61	-	-	(%)
راندمان انرژی پیل سوختی	31.45	-	-	(%)
بازگشت ناپذیری تولیدی در پیل سوختی	84.21	-	-	(kW)

پلیمری باید طوری ساخته شود که ضریب استوکیومتری هیدروژن پایین باشد تا راندمان سیستم افزایش یابد.

در شکل (۴-۱۸) نیز تأثیر ضریب استوکیومتری هیدروژن بر راندمان های انرژی سیستم نشان داده

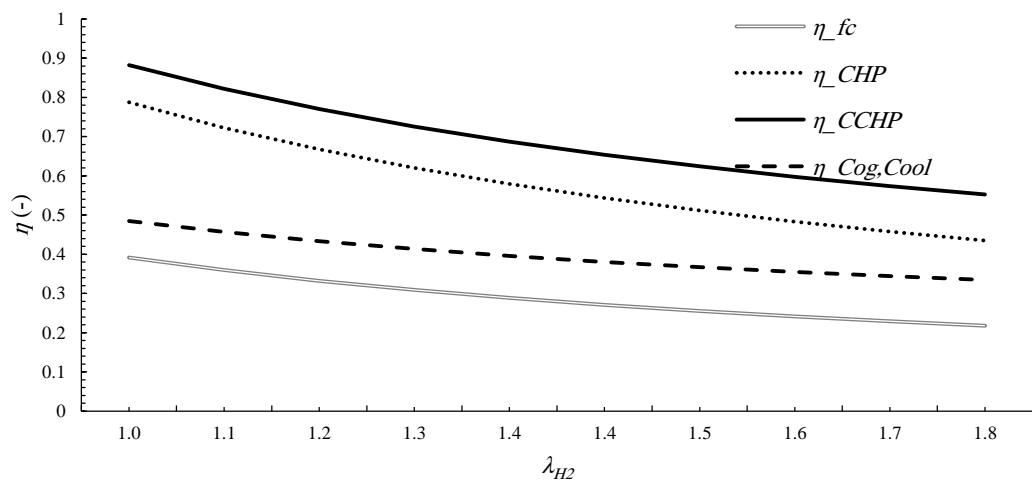
جدول (۴-۹): نتایج ناشی از مدل‌سازی چیلر جذبی

پارامتر	مقدار	واحد
حرارت ورودی به ژنراتور	19.26	(kW)
حرارت دریافتی از اواپراتور	12.23	(kW)
حرارت خروجی از جذب کننده	18.63	(kW)
حرارت خروجی از کندانسور	12.87	(kW)
ضریب عملکرد چیلر	0.635	(-)
بازگشت ناپذیری تولیدی	5.93	(kW)

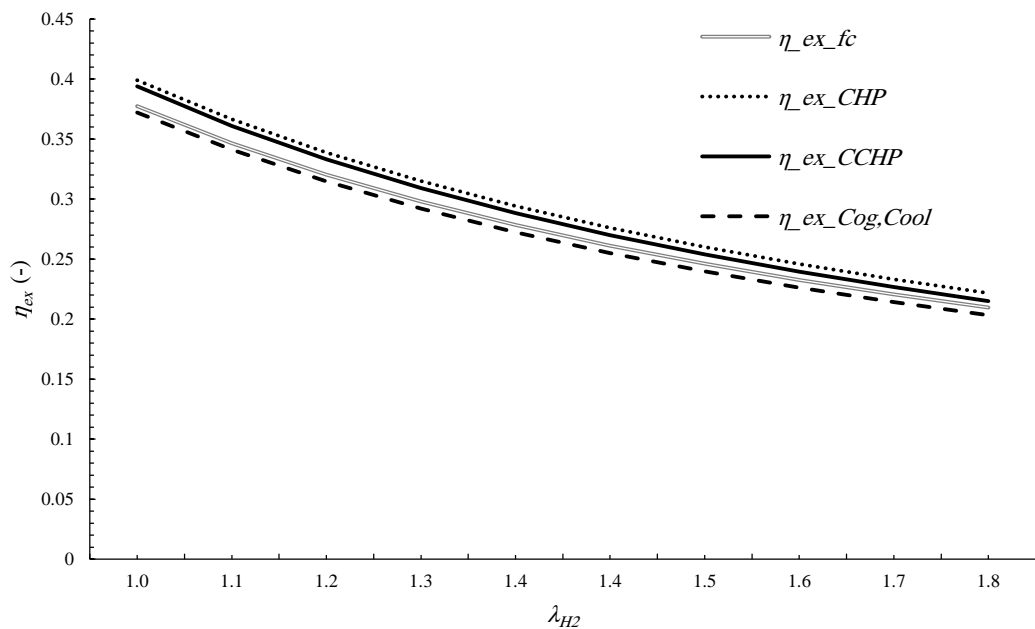
جدول (۴-۱۰): نتایج ناشی از شبیه‌سازی کل سیکل

پارامتر	مقدار	واحد
راندمان انرژی در حالت CHP	65.5	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایه‌اش	42.81	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CCHP	75.83	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CHP	33.25	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایه‌اش	30.88	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CCHP	32.67	(%)
درصد کاهش مصرف سوخت	40.23	(%)
درصد کاهش آلاینده‌گی	22.75	(%)

شده است و همانطور که مشخص است مشابه همان شکل (۴-۱۷) به خاطر بالا رفتن مصرف سوخت با افزایش ضریب استوکیومتری راندمان‌های انرژی کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که نحوه ساخت این پکیج بسیار مهم است و اگر پیل سوختی پکیج به گونه‌ای ساخته شود که میزان

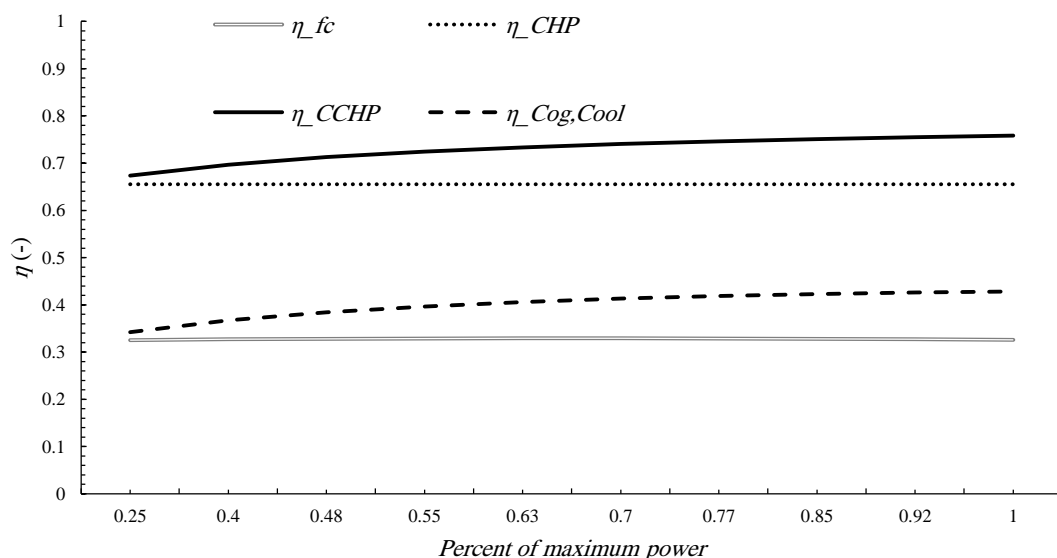


شکل (۴-۱۷): تاثیر ضریب مصرف هیدروژن بر راندمان‌های انرژی سیستم



شکل (۴-۱۸): تاثیر ضریب مصرف هیدروژن بر راندمان‌های انرژی سیستم

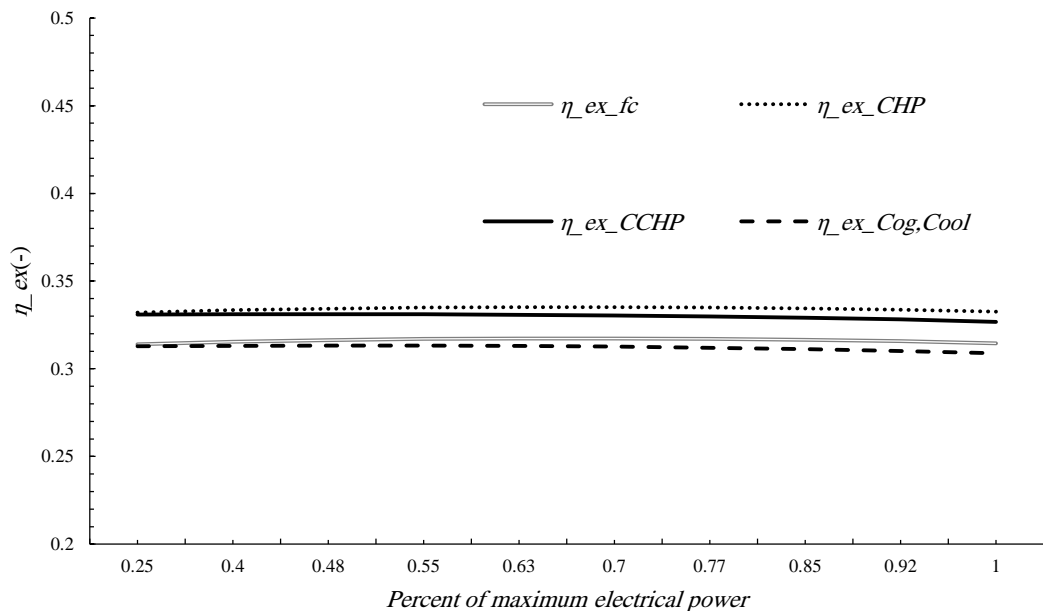
هیدروژن اضافی مورد نیاز پیل کمتر باشد؛ هم راندمان انرژی و هم راندمان انرژی به طور چشم-گیری افزایش می‌یابد. در شکل (۱۹-۴) تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی تولیدی بر راندمان‌های انرژی سیستم، در چهار حالت مختلف قابل مشاهده است. همان‌طور که از شکل (۱۹-۴) مشخص است با افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی راندمان‌های انرژی پیل سوختی پلیمری و حالت تولید دوگانه برق و حرارت تقریباً ثابت مانده است، اما وقتی سیستم در حالت CCHP و تولید برق و سرمایش قرار می‌گیرد، افزایش راندمان همزمان با افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی قابل مشاهده است، چون با افزایش توان پیل سوختی، دبی گازهای خروجی از بویلر افزایش می‌یابد، لذا ضریب عملکرد نیز با افزایش حرارت ورودی به ژنراتور چیلر افزایش می‌یابد و در نتیجه سیستم در حالتی که سرمایش تولید کند راندمان بیشتری خواهد داشت.



شکل (۱۹-۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان‌های انرژی سیستم

در شکل (۲۰-۴) به تاثیر افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان‌های انرژی سیستم در چهار حالت مختلف پرداخته شده است. همان‌طور که از شکل (۲۰-۴) مشخص است با افزایش درصد

از حداکثر توان الکتریکی؛ راندمان انرژی تغییر چندانی ندارد، علت عدم تغییرات راندمان انرژی نیز به تعریف انرژی باز می‌گردد؛ زیرا در انرژی مسئله‌ی مهم کار تولیدی است و حرارت قابل استفاده تاثیر چندانی در راندمان انرژی نخواهد داشت لذا چون با افزایش کار تولیدی؛ انرژی ورودی به سیستم نیز تقریباً با شیب ثابتی افزایش می‌یابد، نسبت کار خروجی به انرژی ورودی ثابت می‌ماند و در نتیجه نمودار تغییرات درصد از حداکثر توان الکتریکی تولیدی با راندمان‌های انرژی بصورت خط افقی و نزدیک به همان راندمان انرژی پیل سوختی باقی مانده است.

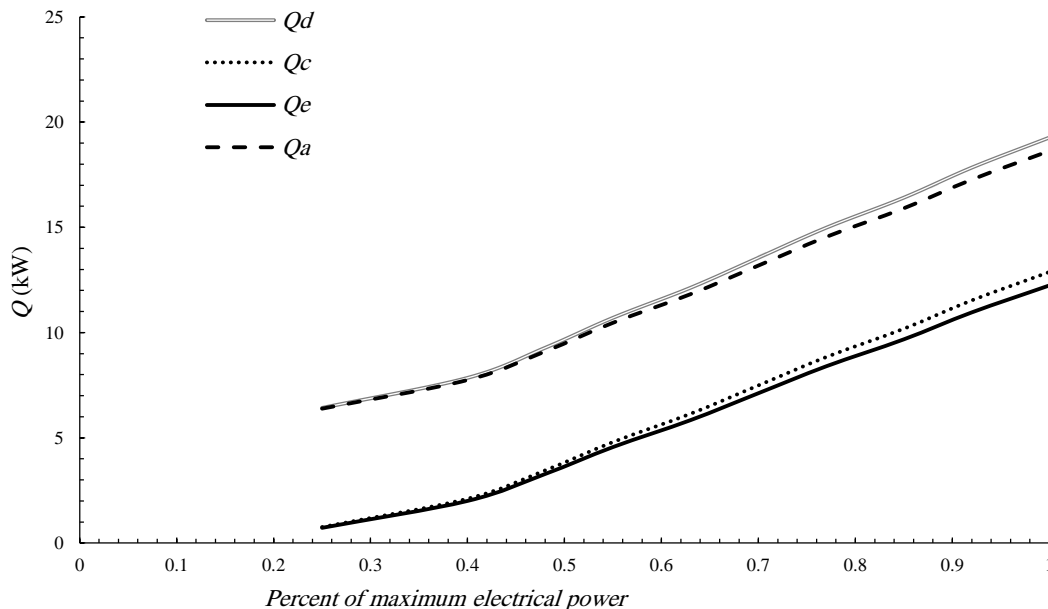


شکل (۴-۲۰): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر راندمان‌های انرژی سیستم

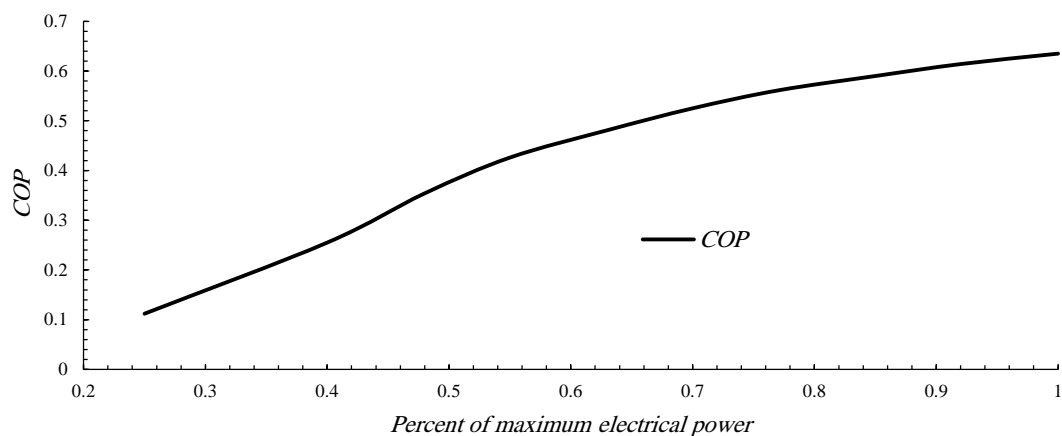
در شکل (۴-۲۱) تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر حرارت‌های سیکل جذبی نشان داده شده است و همانطور که انتظار می‌رفت با توجه به افزایش درصد از حداکثر بار الکتریکی تولیدی، حرارت‌های تبادل شده در چیلر به خاطر افزایش دبی جرمی خروجی از بویلر رشد می‌کند.

در شکل (۴-۲۲) تاثیر درصد از حداکثر بار الکتریکی بر ضریب عملکرد چیلر جذبی سیکل نشان داده شده است. و با توجه به افزایش حرارت ورودی به ژنراتور چیلر جذبی؛ ضریب عملکرد چیلر به خاطر افزایش حرارت ورودی به ژنراتور چیلر افزایش می‌یابد.

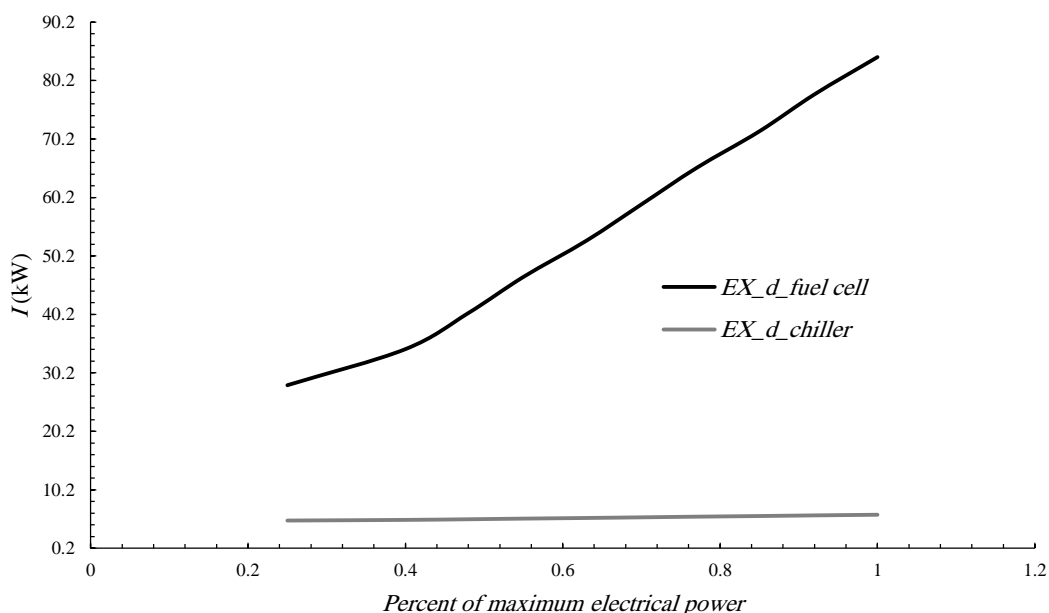
در شکل (۴-۲۳) به تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر بازگشت‌ناپذیری در پیل سوختی و چیلر جذبی پرداخته شده است. همانطور که از نمودار (۴-۲۳) پیداست بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل سوختی پلیمری به شدت به توانی که پیل تولید می‌کند وابسته است اما در چیلر جذبی این چنین نیست، علت این امر در این نکته نهفته است که پیل سوختی وسیله‌ای برای تولید کار است اما چیلر جذبی وسیله‌ای برای تبادل حرارت لذا کاملاً منطقی به نظر می‌رسد که با توجه به وابستگی شدید تعریف اگزرژی به کار تولیدی تغییرات بازگشت‌ناپذیری در پیل سوختی بسیار زیاد اما در چیلر جذبی بسیار کم باشد.



شکل (۴-۲۱): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر حرارت‌های تولیدی سیستم



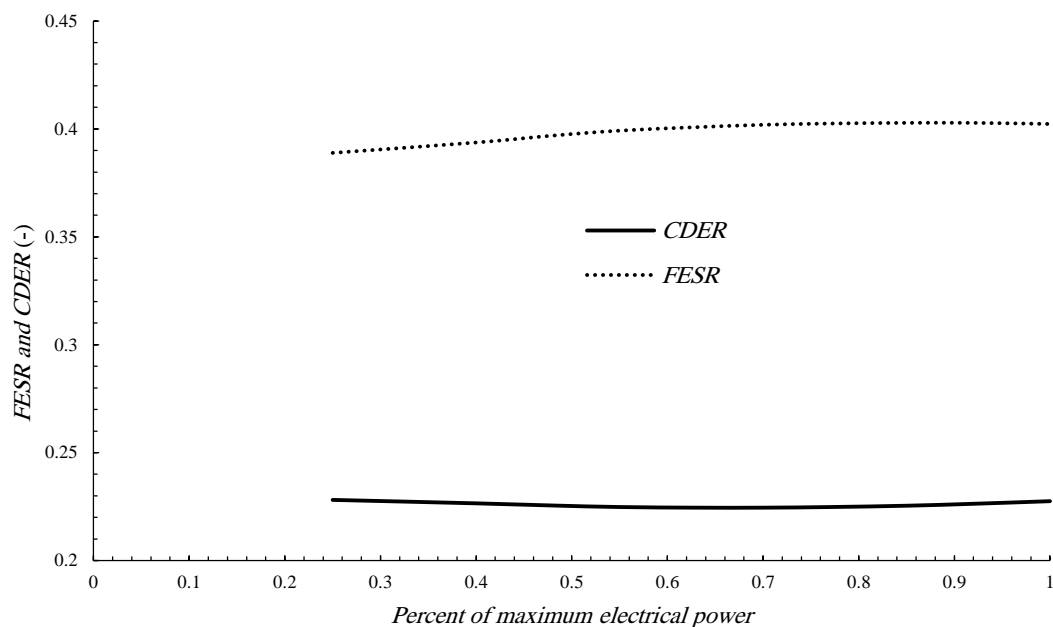
شکل (۴-۲۲): تاثیر درصد از حداکثر توان بر ضریب عملکرد چیلر جذبی



شکل (۴-۲۳) تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر بازگشت ناپذیری‌های پیل سوختی و چیلر جذبی

در شکل (۴-۲۴) تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی قابل مشاهده است. همانطور که از این نمودار پیداست با افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی میزان صرفه جویی مصرف سوخت افزایش می‌یابد اما میزان کاهش آلاینده‌گی تقریباً ثابت می‌ماند و علت افزایش میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت تفاوت راندمان‌های سیستم‌های سنتی با پیل

سوختی است که چون راندمان پیل سوختی بیشتر است لذا با افزایش کار خروجی از پیل میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت در مقایسه با سیستم‌های سنتی نیز بیشتر می‌گردد.

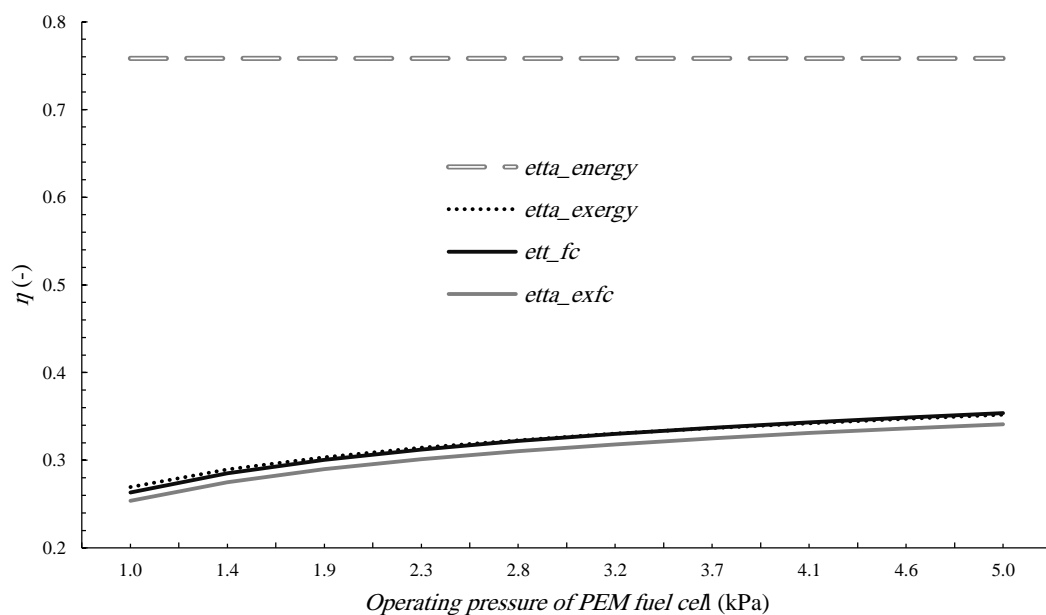


شکل (۴-۲۴): تاثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی

در شکل (۴-۲۵) تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر راندمان‌های انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان نشان داده شده است. همانطور که از شکل (۴-۲۵) مشخص است با افزایش فشار کاری پیل سوختی پلیمری چون کار تولیدی افزایش می‌یابد راندمان‌های انرژی و انرژی نیز افزایش می‌یابند.

در شکل (۴-۲۶) نیز تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به بالا رفتن راندمان سیستم در اثر افزایش فشار کاری پیل سوختی، سیستم در مقایسه با سیستم سنتی که همان مقدار کار تولید کند، مصرف سوخت کمتری دارد، در نتیجه درصد کاهش مصرف سوخت نیز افزایش یافته است. از طرف دیگر با افزایش فشار کاری پیل سوختی چون کار خروجی از پیل سوختی افزایش و حرارت تولیدی کاهش می‌یابد لذا سیستم سنتی که قرار است با سیستم حاضر مقایسه شود باید حرارت کمتری تولید کند.

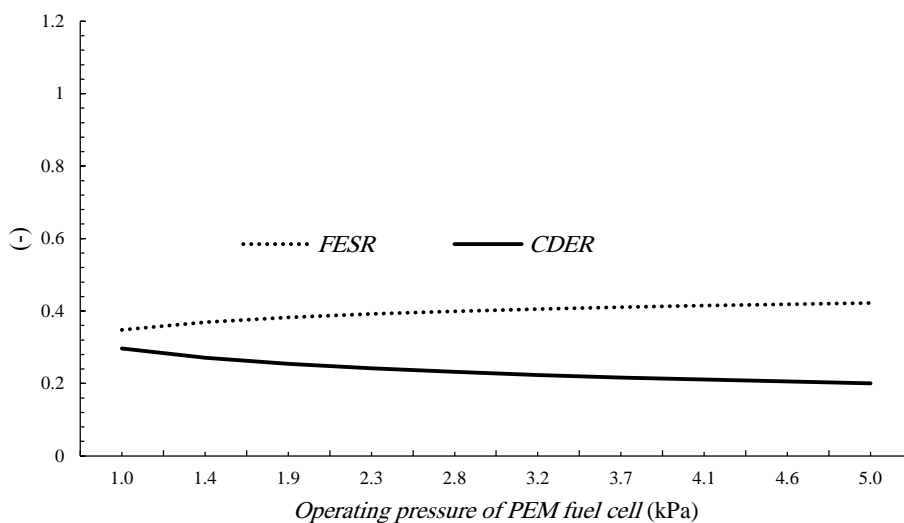
در شکل (۴-۲۷) نیز میزان بازگشت ناپذیری تولیدی در هر جز سیکل از جمله پیل سوختی پلیمری،



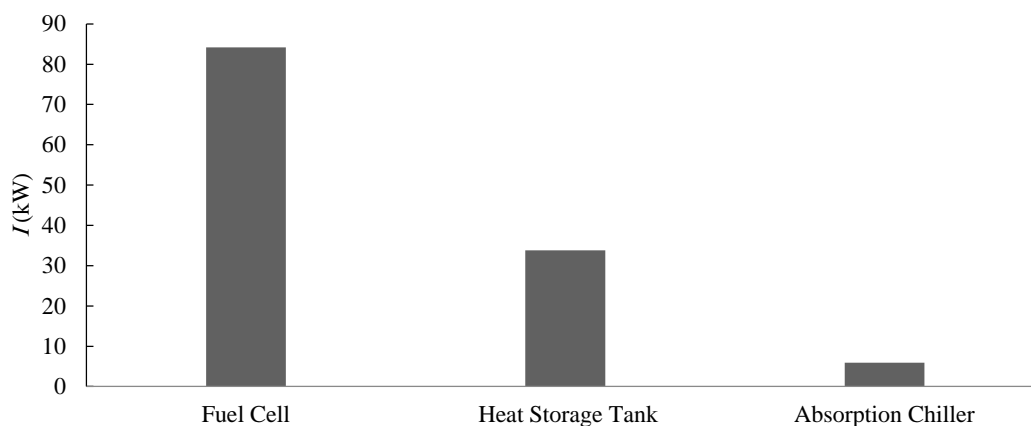
شکل (۴-۲۵): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر راندمان‌ها

چیلر جذبی و مخزن ذخیره حرارتی نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است،

بیشترین بازگشت ناپذیری تولیدی در سیکل مربوط به پیل سوختی است.

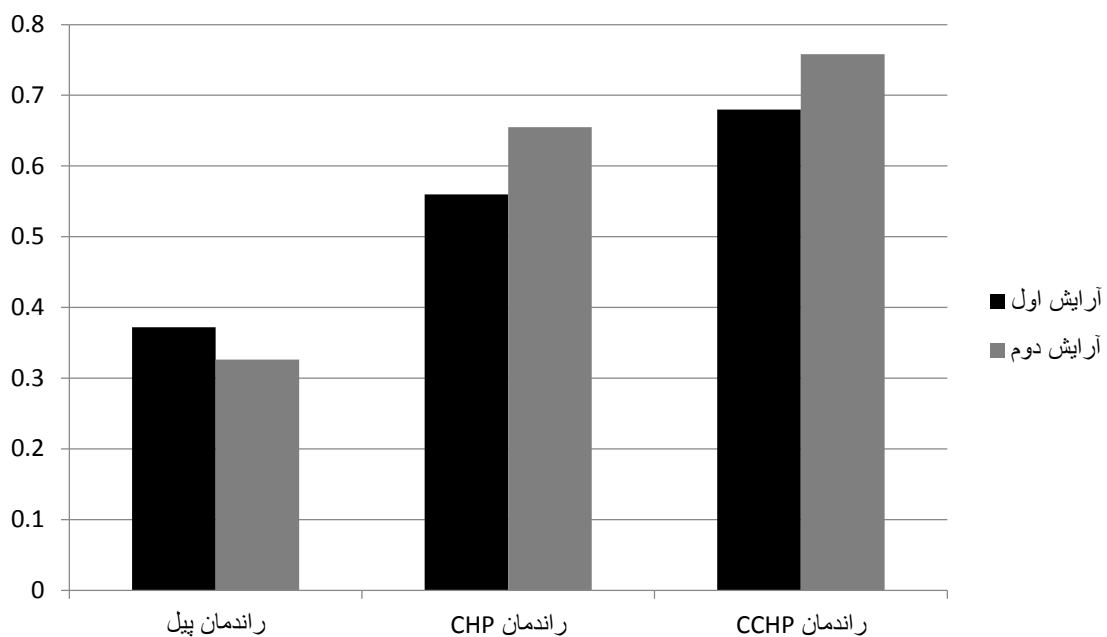


شکل (۴-۲۶): تاثیر فشار کاری پیل سوختی بر درصد کاهش مصرف سوخت، درصد کاهش تولید آلاینده‌گی و ضریب عملکرد چیلر جذبی

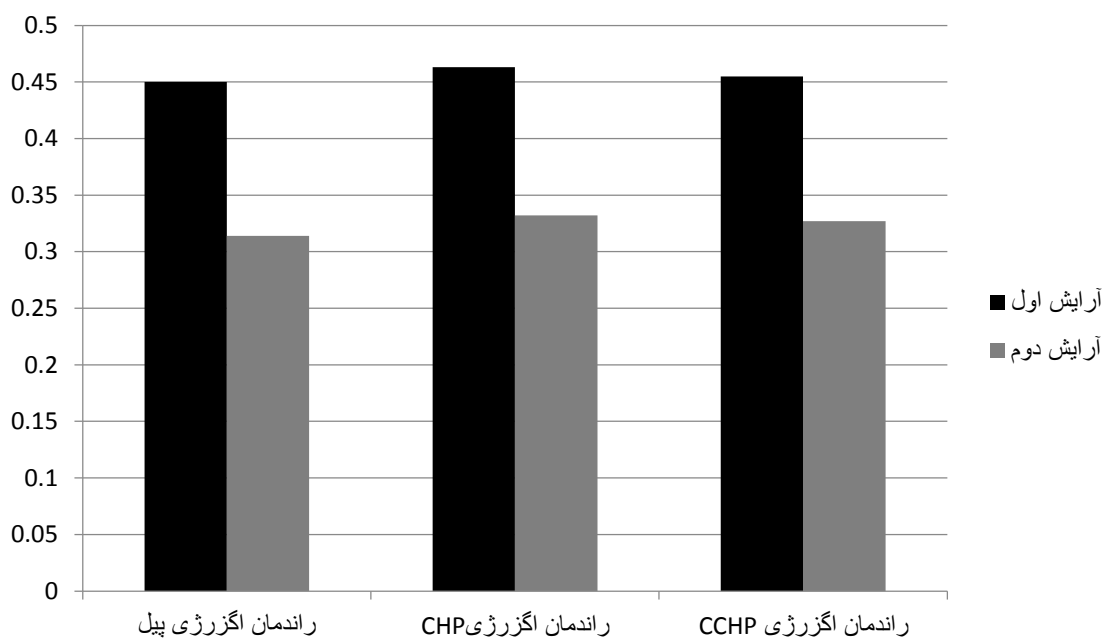


شکل (۴-۲۷): بازگشت ناپذیری اجزای سیستم

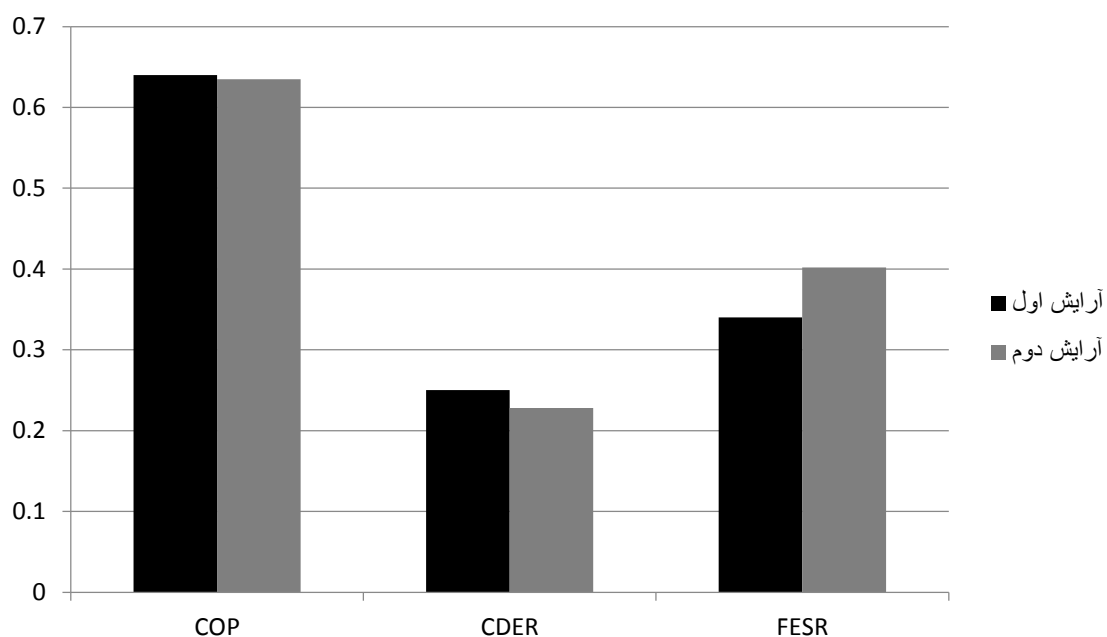
در شکل (۴-۲۸) راندمان‌های انرژی دو سیستم با هم مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل (۴-۲۹) نیز راندمان‌های انرژی این دو آرایش مقایسه شده است. در شکل (۴-۳۰) نیز مباحث اقتصادی، زیست محیطی و ضریب عملکرد چیلر جذبی این دو آرایش نیز نشان داده شده است.



شکل (۲۸-۴) مقایسه‌ی راندمان‌های انرژی دو آرایش



شکل (۲۹-۴) مقایسه‌ی راندمان‌های آگزرژی دو آرایش



شکل (۴-۳) مقایسه‌ی COP, FESR و CDER دو آرایش

در پایان این فصل در این فصل دو آرایش برای سیستم تولید همزمان بر پایه‌ی پیل سوختی پلیمری ارائه شده است، با کمک معادلات ارائه شده در فصل سوم کل سیکل مورد مدل‌سازی قرار گرفت و نتایج ناشی از مدل‌سازی دو آرایش در جدول (۴-۱۱) ارائه شده است. همچنین در فصل بعد نتایج جمع‌بندی شده و پیشنهاداتی ارائه می‌گردد.

جدول (۴-۱۱) نتایج ناشی از مدل‌سازی دو سیکل برای مقایسه

پارامتر	مقدار آرایش اول	مقدار آرایش دوم	واحد
راندمان انرژی در حالت CHP	55.9	65.5	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایه‌اش	49.1	42.81	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CCHP	68	75.83	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CHP	46.3	33.25	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایه‌اش	44.2	30.88	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CCHP	45.5	32.67	(%)
درصد کاهش مصرف سوخت	34	40.23	(%)
درصد کاهش آلاینده‌گی	25	22.75	(%)

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

سیستم‌های تولید همزمان دارای مزایای عمده اقتصادی و زیست‌محیطی هستند. به همین دلیل استفاده از این سیستم‌ها در کاربردهای صنعتی و تأمین برق، گرمایش و سرمایش ساختمان‌های تجاری، اداری و مسکونی در سال‌های اخیر افزایش یافته است. از طرف دیگر از تانک ذخیره حرارتی و چیلر جذبی می‌توان برای بازیافت حرارت اتلافی پیل سوختی استفاده نمود. در این تحقیق عملکرد سیستم تولید همزمان سه‌گانه با کمک نرم‌افزار EES مورد بررسی قرار گرفت و سعی شد با تعویض آرایش و سوخت ورودی پیل، عملکرد سیستم تولید همزمان سه‌گانه بهبود یابد.

۵-۲ نتیجه‌گیری سیستم اول

- پیل سوختی مورد بررسی در این پژوهش دارای توان نامی الکتریکی $38/63$ کیلووات است. پیل در این توان $39/17$ کیلووات حرارت تولید می‌کند که طبق فرض اولیه 50% این حرارت به تانک ذخیره حرارتی و 50% دیگر به ژنراتور چیلر جذبی داده شده است؛ توان اوپراتور چیلر $12/53$ کیلووات و ضریب عملکرد چیلر جذبی $0/64$ محاسبه شده است.

- راندمان انرژی سیستم در حالت پیل به‌تنهایی $37/21\%$ ، در حالت تولید دوگانه برق و حرارت $55/9\%$ ؛ در حالت تولید برق و سرمایش $49/1\%$ و در حالت تولید سه‌گانه برق، حرارت و سرمایش 68% به‌دست آمده است.

- با افزایش درصد از حداکثر توان پیل، راندمان‌های پیل و تولید دوگانه برق و حرارت تقریباً ثابت می‌ماند، اما در حالتی که سیستم به تولید دوگانه برق و سرمایش یا تولید سه‌گانه می‌پردازد، راندمان افزایش می‌یابد.

- با افزایش فشار کاری پیل سوختی و فشار بالای سیکل جذبی ضریب عملکرد چیلر کاهش می‌یابد، اما با افزایش توان پیل سوختی، ضریب عملکرد چیلر جذبی افزایش می‌یابد.

از دیدگاه انرژی نتایج به دست آمده را می توان به طور خلاصه در ادامه ارائه کرد:

- راندمان انرژی سیستم در حالت پیل به تنهایی ۰/۴۵٪، در حالت تولید دوگانه برق و حرارت ۰/۴۶۳٪؛ در حالت تولید برق و سرمایش ۰/۴۴۲٪ و در حالت تولید سه گانه برق، حرارت و سرمایش ۰/۴۵۵٪ بدست آمده است.

- محاسبات نشان داده است که بیشترین بازگشت ناپذیری در پیل سوختی رخ می دهد و مقدار آن ۴۷/۲۱ کیلووات است و بازگشت ناپذیری تولیدی در چیلر جذبی ۵/۹۵ کیلووات است.

- راندمان انرژی سیستم وابستگی چندانی به توان تولیدی پیل ندارد؛ اما نرخ بازگشت ناپذیری تولیدی در پیل با افزایش درصد از حداکثر توان افزایش می یابد، از طرف دیگر با افزایش فشار کاری پیل سوختی، بازگشت ناپذیری تولیدی در پیل کاهش می یابد و در نتیجه راندمان های انرژی افزایش می یابد.

از دیدگاه صرفه جویی در مصرف سوخت نیز می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- در سیستم حاضر در مقایسه با سیستم های سنتی تولید برق، حرارت و سرمایش، ۳۴٪ کاهش مصرف سوخت رخ می دهد.

- با افزایش توان پیل سوختی میزان صرفه جویی در مصرف سوخت افزایش می یابد، همچنین با افزایش فشار کاری پیل نیز صرفه جویی بیشتری در مصرف سوخت رخ می دهد.

همچنین از دیدگاه کاهش آلاینده های زیست محیطی نیز نتایج بدست آمده که عبارتند از:

- در سیستم حاضر در مقایسه با سیستم های سنتی تولید برق، حرارت و سرمایش، ۲۵٪ کاهش آلاینده های رخ می دهد.

- با افزایش توان پیل سوختی میزان کاهش تولید الاینده‌گی تغییر چندانی نمی‌کند اما با بالا بردن فشار کاری پیل سوختی میزان کاهش تولید آلاینده‌گی کم می‌شود.

۳-۵ نتیجه‌گیری سیستم دوم

تحلیل انرژی سیستم دوم به شرح ذیل است:

- پیل سوختی مورد بررسی در این پژوهش دارای توان نامی الکتریکی $38/63$ کیلووات است. پیل در این توان $39/17$ کیلووات حرارت تولید می‌کند که کل این حرارت تولیدی به تانک ذخیره حرارتی و انرژی گازهای خروجی از بویلر مبدل سوختی نیز به ژنراتور چیلر جذبی داده شده است؛ توان اواپراتور چیلر $12/23$ کیلووات و ضریب عملکرد چیلر جذبی $0/635$ محاسبه شده است.

- راندمان انرژی سیستم در حالت پیل به تنهایی $32/61\%$ ، در حالت تولید دوگانه برق و حرارت $65/5\%$ ؛ در حالت تولید برق و سرمایش $42/8\%$ و در حالت تولید سه‌گانه برق، حرارت و سرمایش $75/8\%$ بدست آمده است.

- با افزایش درصد از حداکثر توان پیل، راندمان‌های پیل و تولید دوگانه برق و حرارت تقریباً ثابت می‌ماند، اما در حالتی که سیستم به تولید دوگانه برق و سرمایش یا تولید سه‌گانه می‌پردازد، راندمان افزایش می‌یابد.

- با افزایش فشار کاری پیل سوختی و فشار بالای سیکل جذبی ضریب عملکرد چیلر کاهش می‌یابد، اما با افزایش توان پیل سوختی، ضریب عملکرد چیلر جذبی افزایش می‌یابد.

از دیدگاه انرژی نتایج بدست آمده را می‌توان بطور خلاصه در ادامه ارائه کرد:

- راندمان انرژی سیستم در حالت پیل به تنهایی ۳۱/۴۵٪، در حالت تولید دوگانه برق و حرارت ۳۳/۲۵٪؛ در حالت تولید برق و سرمایش ۳۰/۹٪ و در حالت تولید سه‌گانه برق، حرارت و سرمایش ۳۲/۶۷٪ بدست آمده است.
 - محاسبات نشان داده است که بیشترین بازگشت ناپذیری در پیل سوختی رخ می‌دهد و مقدار آن ۸۴/۲۱ کیلووات است؛ و بازگشت ناپذیری تولیدی در چیلر جذبی ۵/۹۳ کیلووات است.
 - راندمان انرژی سیستم وابستگی چندانی به توانی که پیل تولید می‌کند ندارد؛ اما نرخ بازگشت ناپذیری تولیدی در پیل با افزایش درصد از حداکثر توان افزایش می‌یابد، از طرف دیگر با افزایش فشار کاری پیل سوختی، بازگشت ناپذیری تولیدی در پیل کاهش می‌یابد و در نتیجه راندمان‌های انرژی افزایش می‌یابد.
- از دیدگاه صرفه‌جویی در مصرف سوخت نیز می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:
- در سیستم حاضر در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید برق، حرارت و سرمایش، ۴۰/۲۳٪ کاهش مصرف سوخت رخ می‌دهد.
 - با افزایش توان پیل سوختی میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش فشار کاری پیل نیز صرفه‌جویی بیشتری در مصرف سوخت رخ می‌دهد.
- همچنین از دیدگاه کاهش آلاینده‌های زیست محیطی نیز نتایج بدست آمده که عبارتند از:
- در سیستم حاضر در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید برق، حرارت و سرمایش، ۲۲/۷۵٪ کاهش آلاینده‌گی رخ می‌دهد.
 - با افزایش توان پیل سوختی میزان کاهش تولید آلاینده‌گی تغییر چندانی نمی‌کند اما با بالا بردن فشار کاری پیل سوختی میزان کاهش تولید آلاینده‌گی کم می‌شود.

۴-۵ نتیجه گیری کلی

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شده است که فشار کاری پیل سوختی پلیمری بر عملکرد سیستم تأثیر گذار است و هرچه فشار کاری پیل بالاتر باشد سیستم عملکرد بهتری خواهد داشت. از سوی دیگر با افزایش دمای پیل نیز راندمان پیل کاهش می‌یابد و به خاطر جلوگیری از طولانی شدن بحث از نمودارهای آن صرف نظر شده است. همچنین نتایج نشان داد که وقتی پیل سوختی با سوخت هیدروژن کار می‌کند، در مقایسه با وقتی که سوخت پیل متان است، راندمان بیشتری دارد، اما مسئله‌ی مهم این است که وقتی سیستم در حالت تولید سه‌گانه با آرایش دوم کار می‌کند راندمان تولید سه‌گانه بالاتری دارد. از لحاظ انرژی نیز سیستم در حالت اول، چه در حالت تولید برق به تنهایی چه در حالت تولید سه‌گانه بهتر عمل می‌کند. از لحاظ صرفه‌جویی در مصرف سوخت سیستم‌های حاضر با سیستم‌های سنتی مقایسه شد و نتایج نشان داد که از لحاظ کاهش مصرف سوخت سیستم در حالت دوم صرفه‌جویی بیشتری دارد؛ اما از لحاظ کاهش میزان آلاینده‌ی کربن دی‌اکسید سیستم در حالت اول و دوم تفاوت چندانی ندارد و لی از لحاظ عددی سیستم با آرایش اول برای محیط زیست مناسب تر است.

۵-۵ پیشنهادات

پیشنهاد می‌شود که تحقیق حاضر در آینده برای مسائل زیر گسترش داده شود.

- ساختمان مبنایی برای سیستم حاضر معرفی شود و محاسبات برای انتخاب ظرفیت بهینه محرک اولیه با توجه به میزان انرژی مورد نیاز ساختمان محاسبه شود.
- تحلیل اقتصادی سیستم برای ساختمان مبنای بر اساس دوره بازگشت سرمایه و میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه در هر فصل از سال و تحلیل زیست محیطی سیستم برای ساختمان مبنای انجام پذیرد.

- مقایسه بین سیستم‌های CCHP با پیل‌های سوختی مختلف با سیستم حاضر بر مبنای انرژی، انرژی، زیست محیطی و اقتصادی انجام شود.
- بررسی سوخت‌های مختلف مورد استفاده در پیل برای این آرایش‌ها و تحلیل انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست محیطی هم می‌تواند مفید باشد.

- [1] Gu, Q., Ren, H., Gao, W., and Ren, J. (2012) "**Integrated assessment of combined cooling heating and power systems under different design and management options for residential buildings in Shanghai**" *Energy and Buildings*, 51, pp 143-152.
- [2] M, Maerefat and P, Shafie. (2014) "**Design of CCHP system for office buildings in Tehran and thermodynamical, environmental and economical evaluation in comparison to conventional system**" *Modares Mechanical Engineering*, 14, 6, pp 124-134. (In Persian)
- [3] Wang J.-J., Jing Y.-Y. and Zhang C.-F. (2010) "**Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm**" *Applied Energy*, 87, 4, pp 1325-1335
- [4] Kerr T. (2008) "**Combined heating and power and emissions trading: options for policy makers**" *International Energy Agency*
- [5] Mago P.J., Hueffed A. and Chamra L.M. (2010) "**Analysis and optimization of the use of CHP–ORC systems for small commercial buildings**" *Energy and Buildings*, 42, 9, pp 1491-1498
- [6] ملکیان ع، (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد: "بررسی و بهبود عملکرد سیستم CCHP"، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- [7] Goldstein L., Hedman B., Knowles D., Freedman S.I., Woods R. and Schweizer T. (2003), "**Gas-fired distributed energy resource technology characterizations**", Reprinted from: National Renewable Energy Laboratory, pp 11-30.
- [8] Kolanowski, B. F. (2013). "**Small-scale cogeneration handbook**." Lulu Press, Inc.
- [9] Petchers N. (2003), "**Combined heating, cooling & power handbook: Technologies & applications: An integrated approach to energy resource optimization**", Reprinted from: The Fairmont Press, Inc.

- [10] Praetorius B. and Schneider L. (2006), "**MICRO COGENERATION: TOWARDS A DECENTRALIZED AND SUSTAINABLE GERMAN ENERGY SYSTEM?**", 29th IAEE International Conference, Potsdam, pp 7-10
- [11] Staunton R. and Ozpineci B. (2003), "*Microturbine power conversion technology review*", Reprinted from: United States. Department of Energy.
- [12] Fuel cells, Accessed on 20 August 2015; <http://www.sunu.org.ir/fa/hydrogen/fuelcell/types>
- [13] Larminie, J., Dicks, A., & McDonald, M. S. (2003). "*Fuel cell systems explained* " ,(Vol. 2). New York: Wiley.
- [14] Chamra L.M. and Mago P. (2007) "**Micro-CHP power generation for residential and small commercial buildings**" *Electric Power Research Trends*, pp 47-101
- [15] Borbely A.-M. and Kreider J.F. (2001), "*Distributed generation: the power paradigm for the new millennium*", Reprinted from: CRC press.
- [16] Thumann A. and Mehta D.P. (2001), "*Handbook of energy engineering*", Reprinted from: The Fairmont Press, Inc.
- [17] Wu D.W. and Wang R.Z. (2006)"**Combined cooling, heating and power: A review**" *Progress in Energy and Combustion Science*, 32, 5-6, pp 459-495.
- [18] Cardona E., Piacentino A. and Cardona F. (2006) "**Energy saving in airports by trigeneration. Part I: Assessing economic and technical potential**" *Applied Thermal Engineering*, 26, 14-15, pp 1427-1436.
- [19] Cardona E., Sannino P., Piacentino A. and Cardona F. (2006) "**Energy saving in airports by trigeneration. Part II: Short and long term planning for the Malpensa 2000 CHCP plant**" *Applied Thermal Engineering*, 26, 14-15, pp 1437-1447.
- [20] Mago P.J. and Chamra L.M. (2009) "**Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations**" *Energy and Buildings*, 41, 10, pp 1099-1106
- [21] Cardona E. and Piacentino A. (2003) "**A methodology for sizing a trigeneration plant in mediterranean areas**" *Applied Thermal Engineering*, 23, 13, pp 1665-1680
- [22] Cardona E., Piacentino A. and Cardona F. (2006) "**Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid CHCP-heat pump systems**" *Energy Conversion and Management*, 47, 20, pp 3530-3542

- [23] Chamra L.M., Mago P.J. and Fumo N. (2009) "**Hybrid-cooling, combined cooling, heating, and power systems**" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223, 5, pp 487-495
- [24] Fang F., Wei L., Liu J., Zhang J. and Hou G. (2012) "**Complementary configuration and operation of a CCHP-ORC system**" *Energy*, 46, 1, pp 211-220.
- [25] Cardona E. and Piacentino A. (2007) "**Optimal design of CHCP plants in the civil sector by thermoeconomics**" *Applied Energy*, 84, 7-8, pp 729-748.
- [26] Cao J.-C. and Liu F.-Q. (2008) "**Simulation and optimization of the performance in the air-conditioning season of a BCHP system in China**" *Energy and Buildings*, 40, 3, pp 185-192.
- [27] Li H., Fu L., Geng K. and Jiang Y. (2006) "**Energy utilization evaluation of CCHP systems**" *Energy and Buildings*, 38, 3, pp 253-257.
- [28] Cho H., Luck R., Eksioğlu S.D. and Chamra L.M. (2009) "**Cost-optimized real-time operation of CHP systems**" *Energy and Buildings*, 41, 4, pp 445-451.
- [29] Huangfu Y., Wu J.Y., Wang R.Z. and Xia Z.Z. (2007) "**Experimental investigation of adsorption chiller for Micro-scale BCHP system application**" *Energy and Buildings*, 39, 2, pp 120-127.
- [30] Pospisil J., Fiedler J., Skala Z. and Baksa M. (2006) "**Comparison of cogeneration and trigeneration technology for energy supply of tertiary buildings**" *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, 1, 3, pp 262-267.
- [31] Chicco G. and Mancarella P.(2008)"**A unified model for energy and environmental performance assessment of natural gas-fueled poly-generation systems**" *Energy Conversion and Management*, 49, 8, pp 2069-2077.
- [32] Kong X.Q., Wang R.Z. and Huang X.H. (2004) "**Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine**" *Energy Conversion and Management*, 45, 9-10, pp 1433-1442.
- [33] Costa A., Paris J., Towers M. and Browne T. (2007) "**Economics of trigeneration in a kraft pulp mill for enhanced energy efficiency and reduced GHG emissions**" *Energy*, 32, 4, pp 474-481.

- [34] Poredoš A., Kitanovski A. and Tuma M. (2002) "**The energy efficiency of chillers in a trigeneration plant**" *Forschung im Ingenieurwesen*, 67, 1, pp 40-44.
- [35] Calva E.T., Núñez M.P. and Toral M.a.R.G. (2005) "**Thermal integration of trigeneration systems**" *Applied Thermal Engineering*, 25, 7, pp 973-984.
- [36] Daolin L. and Shifei Z. "**Tri-generation (electrical power, heated and chilled water) system and their application in shanghai**" *American Society of Mechanical Engineers, Power Division (Publication) PWR*, 34, pp 2.
- [37] Fairchild P., Labinov S., Zaltash A. and Rizy D. (2001), "**Experimental and theoretical study of microturbine-based BCHP system**", Proceedings of the 2001 International ASME Congress and Exposition, IMECE, pp 11-16.
- [38] Labinov S., Zaltash A., Rizy D., Fairchild P., Devault R. and Vineyard E. (2002) "**Predictive algorithms for microturbine performance for bchp systems**" *ASHRAE Transactions*, 108, 2, pp 670-681.
- [39] Henderson H.I., Karambakkam B., Boyer J. and Staudt R. (2006), "**An hourly building simulation model aimed at fuel cell applications**", ASME 2006 4th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, pp 741-750.
- [40] Seifert P. (2000) "**Rational supply of power, heat and cooling in buildings demonstrated in a hospital in Dresden**" *DBI Gasund Umwelttechnik GmbH, Final Technical Report, Project No. BU/0065/97*
- [41] Yu, Z., Han, J., Cao, X., Chen, W., & Zhang, B. (2010). "**Analysis of total energy system based on solid oxide fuel cell for combined cooling and power applications.**" *international journal of hydrogen energy*, 35(7), pp 2703-2707.
- [42] Fontell, E., Kivisaari, T., Christiansen, N., Hansen, J. B., & Pålsson, J. (2004). "**Conceptual study of a 250kW planar SOFC system for CHP application.**" *Journal of Power Sources*, 131(1), pp 49-56.
- [43] Zink, F., Lu, Y., & Schaefer, L. (2007). "**A solid oxide fuel cell system for buildings.**" *Energy Conversion and Management*, 48(3), pp 809-818.

- [44] Radulescu, M., Lottin, O., Feidt, M., Lombard, C., Le Noc, D., & Le Doze, S. (2006). **"Experimental results with a natural gas cogeneration system using a polymer exchange membrane fuel cell"**. *Journal of power sources*, 159(2), pp 1142-1146.
- [45] Hwang, J. J., Wang, P. C., & Kuo, J. K. (2012). **"Simulation and experiment of a cogeneration system based on proton exchange membrane fuel cell"**. *Fuel Cells*, 12(3), pp 326-334.
- [46] Ni, M., Leung, M. K., & Leung, D. Y. (2008). **"Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant."** *Energy conversion and management*, 49(10), pp 2748-2756.
- [47] Zhao, P., Wang, J., Gao, L., & Dai, Y. (2012). **"Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell."** *International journal of hydrogen energy*, 37(4), pp 3382-3391.
- [48] Wang, Y., Shi, Y., Ni, M., & Cai, N. (2014). **"A micro tri-generation system based on direct flame fuel cells for residential applications"**. *international journal of hydrogen energy*, 39(11), pp 5996-6005.
- [49] Yu, Z., Han, J., & Cao, X. (2011). **"Investigation on performance of an integrated solid oxide fuel cell and absorption chiller tri-generation system"**. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(19), pp 12561-12573.
- [50] Chiang, H. W. D., Hsu, C. N., Huang, W. B., Lee, C. H., Huang, W. P., & Hong, W. T. (2012). **"Design and performance study of a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system applied in combined cooling, heating, and power system"**. *Journal of Energy Engineering*, 138(4), pp 205-214.
- [51] Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., & Ottaviano, A. (2011). **"An energetic–exergetic comparison between PEMFC and SOFC-based micro-CHP systems"**. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(4), pp 3206-3214.
- [52] Dodds, P. E., & Hawkes, A. (2014). **"The role of hydrogen and fuel cells in providing affordable, secure low-carbon heat"**. *H2FC SUPERGEN*, London.

- [53] Ferguson, Alex, and V. Ismet Ugursal. (2004) "**Fuel cell modelling for building cogeneration applications.**" *Journal of Power Sources* 137, no. 1, pp 30-42.
- [54] Sugiura, K., & Naruse, I. (2002). "**Feasibility study of the co-generation system with direct internal reforming-molten carbonate fuel cell (DIR-MCFC) for residential use**". *Journal of Power sources*, Vol 106(1), pp 51-59.
- [55] Hosseini, H., & Ghasemi, M., & Pirmohammadi M., & Pirkandi, J., (2011), "**Electrochemical analysis of a molten carbonate fuel cell with internal reforming**", *19th Annual Conference of Mechanical Engineering*, Birjand.
- [56] Napoli, R., Gandiglio, M., Lanzini, A., & Santarelli, M. (2015). "**Techno-economic analysis of PEMFC and SOFC micro-CHP fuel cell systems for the residential sector**". *Energy and Buildings*, Vol 103, pp 131-146.
- [57] Najafi, B., Mamaghani, A. H., Baricci, A., Rinaldi, F., & Casalegno, A. (2015). "**Mathematical modelling and parametric study on a 30 kW el high temperature PEM fuel cell based residential micro cogeneration plant**". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 40, No 3, pp 1569-1583.
- [58] Adam, A., Fraga, E. S., & Brett, D. J. (2015). "**Options for residential building services design using fuel cell based micro-CHP and the potential for heat integration**". *Applied Energy*, 138, pp 685-694.
- [59] Hwang, J. J., Lin, C. H., & Kuo, J. K. (2014). "**Performance analysis of fuel cell thermoelectric cogeneration system with methanol steam reformer**". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 39, No 26, pp 14448-14459.
- [60] Yari. M., Rezaee V.,(2014), "**Modeling a novel design of multi generation package based on the PEM fuel cell**", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No 14, pp 107-121.

- [61] Wang, C., Nehrir, M. H., & Shaw, S. R. (2005). "**Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits**". *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Vol 20, No 2, pp 442-451.
- [62] Barbir, F., & Cells, P. F. (2005). Elsevier Academic Press. "**PEM Fuel Cell: theory and practice**".
- [63] Spiegel, C. (2011). "**PEM fuel cell modeling and simulation using MATLAB. Academic press**".
- [64] Yilanci, A., Dincer, I., & Ozturk, H. K. (2008). "**Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system**". *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(24), pp 7538-7552.
- [65] Obara, S. Y., & Tanno, I. (2008). "**Exergy analysis of a regional-distributed PEM fuel cell system**". *International Journal of Hydrogen Energy*, No 9, Vol 33, pp 2300-2310.
- [66] *Exergy calculator*, Accessed on 20 August 2015; <http://www.exergoecology.com/excalc>
- [67] سلطاندوست م.، (۱۳۹۱)، "چیلر جذبی"، انتشارات یزدا، تهران
- [68] Ochoa, A. A. V., Dutra, J. C. C., Henríquez, J. R. G., & dos Santos, C. A. C. (2016). "**Dynamic study of a single effect absorption chiller using the pair LiBr/H₂O**". *Energy Conversion and Management*, Vol. 108, pp 30-42.
- [69] Şencan, A., Yakut, K. A., & Kalogirou, S. A. (2005). "**Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems**". *Renewable energy*, 30(5), pp 645-657.
- [70] Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Van Wylen, G. J., & Van Wyk, S. (1998). "**Fundamentals of thermodynamics**", Vol. 6, New York: Wiley.

- [71] *Steam methane reformer*, Accessed on 20 August 2015; <http://www.making-hydrogen.com/steam-reforming-hydrogen.html>
- [72] J. Xu and G. Froment, *AIChE J.*, **35**, 88 (1989), J. Xu and G. Froment, *AIChE J.*, **35**, 97 (1989), F. A. N. Fernandes and A. B. Soares, *Lat. Am. Appl. Res.*, **36(3)** 155 (2006).
- [73] Horlock, J. H. (1995). "**Combined power plants—past, present, and future**". *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol. 4, No. 117, pp 608-616.
- [74] Farahnak, M., Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M., & Dashti, F. (2015). "**Optimal sizing of power generation unit capacity in ICE-driven CCHP systems for various residential building sizes**". *Applied Energy*, *158*, pp 203-219.
- [75] Liu, M., Shi, Y., & Fang, F. (2013). "**Optimal power flow and PGU capacity of CCHP systems using a matrix modeling approach**". *Applied Energy*, *102*, pp 794-802.

Abstract

Growing population and industry in this century, causes increase in fossil fuel consumption. On the other hand reduction in fossil fuel resources and increasing pollutions made countries to use renewable energy as fuel and high efficiency power system instead of conventional systems.

In this thesis two arrangements for CCHP system proposed to recover waste heat energy of fuel cell. Proposed systems can use for residential application. This system modeling had been done in energy, exergy, fuel energy saving ratio and carbon dioxide emission reduction way. Output work of fuel cell in this thesis is 38.63 kW and heat generated by PEM is 39.17 kW. First arrangement fuel cell energy efficiency is 37.21% but second is 32.61%. Also when first system works in CCHP mode efficiency is 68% but second arrangement's efficiency in CCHP mode is 75.83%.

The highest irreversibility losses occur at PEM, first system irreversibility is 47.21 kW but second system irreversibility is 84.21 kW. First system has 34% and 25% FESR and CDER respectively. But FESR and CDER of second system is 40.23% and 22.75% respectively. Also results showed that increase in PEM fuel cell operating pressure, growth energy and exergy efficiency of PEM but decreases COP of absorption chiller.

Keywords: CCHP, Energy, Exergy, CDER, FESR



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

**Modeling and performance improvement of combined
cooling, heating and power (CCHP) system driven by
fuel cell**

Behrad Alizadeh Kharkeshi

Supervisors:

Dr. Mahmood Chahartaghi

February 2016