

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه سیستم‌های انرژی

بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم تولید همزمان حرارت، سرما و قدرت (CCHP) همراه با پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)

نگارنده : سید مهدی میری

اساتید راهنما

دکتر محمود چهارطاقی

دکتر سید مجید هاشمیان

شهریور ۹۸

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای سید مهدی میری با شماره دانشجویی ۹۶۱۴۸۶۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی تحت بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم تولید همزمان حرارت، سرما و قدرت (CCHP) همراه با پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) که در تاریخ..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه:)	<input type="checkbox"/> مردود
<input type="checkbox"/> نظری	<input type="checkbox"/> عملی

نوع تحقیق:

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
			۱- استاد راهنمای اول
			۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
			۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
			۵- استاد ممتحن اول
			۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

یگانه آفریدگار من، تو را سپاس می گویم که مرا از تمام وابستگی های رهائی و ترس از دست دادن راز من دور کردی و چنان روحم را بزرگ کردی که دل بسته باشم نه وابسته. کلمات از شکر و قدردانی از جناب آقایان دکتر محمود چهارطاقی و سید مجید هاشمیان که در طول تدوین این اثر اینجناب را بارها همیانی های عالمانه خود این جانب را هدایت کردند عاجزند. با این وجود امیدوارم با تلاش مداوم زحمات این بزرگواران را جبران کنم.

از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر محمود چهارطاقی و سید مجید هاشمیان که در کمال سع

صدر، با خلق و فروتنی از هیچ گلی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی

این پژوهش را بر عهده داشتند، کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب سید مهدی میری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم تولید همزمان سرما، حرارت و قدرت همراه با پیل سوختی کربنات مذاب تحت راهنمایی دکتر محمود چهارطاقی و سید مجید هاشمیان متعهد میشوم

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

تأمین انرژی مورد نیاز زندگی یکی از الزامات طبیعی بشریت می‌باشد و در طول تاریخ ابزارت تهیه و توزیع انرژی روز به روز در حال پیشرفت بوده است و محققان در گوشه جهان هرکدام به دنبال راهی جهت کاهش مصرف انرژی همراه با توجیه‌های اقتصادی هستند. در این پژوهش یک پیل سوختی کربنات مذاب مدل‌سازی شده است. این دستگاه به ترتیب ۳۰۵۵ و ۲۴۵۴ برق و حرارت تولید کرد. با توجه به این که در اغلب سیستم‌ها جهت خنک‌کاری از سیال عامل آب استفاده می‌کند، برای خنک‌کاری پیل سوختی موردنظر از سیال نامبرده استفاده شده است و آب خروجی جهت تولید سرما وارد یک چیلر جذبی تک اثره شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد بازده پیل سوختی و چیلر جذبی به ترتیب ۵۹/۷۷٪ و ۸۴٪ می‌باشد. جهت تولید سرما مقداری از کار خروجی وارد چیلر تراکمی شد. با مدل‌سازی چیلر تراکمی هوا خنک، ضریب عملکرد چیلر تراکمی ۳/۶۱۱ و بازده انرژی سیکل بعد از استفاده از چیلر تراکمی به ۷۹/۸۸ رسید. تحلیل انرژی، بررسی سیستم از لحاظ قانون دوم ترمودینامیک می‌باشد. با تحلیل انرژی سیستم بازده انرژی پیل سوختی، چیلر جذبی و چیلر تراکمی ۴۹/۷۷، ۸۱/۴ و ۳۲/۳ محاسبه شدند و تخریب انرژی اجزا نامبرده به ترتیب ۳۱۱۲، ۳/۲۵۶ و ۴۹/۷۷ و بازده انرژی سیستم پس از استفاده از چیلر تراکمی از ۸۱/۴۴ به ۸۱/۶۸ ارتقا یافت. با تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیکل نتایج نشان داد که سیستم تا پایان عمر کاری خود، حداقل ۲ بار خرابی تجربه خواهد کرد قابلیت اطمینان آن در طی بازه‌ای که سیستم به طور کامل تا آخرین خرابی کار می‌کند از ۹۸٪ به حدود ۰٪ رسید. تحلیل اقتصادی سیستم نشان داد که بازگشت سرمایه سیستم مذکور ۳/۵ سال و نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن نرخ تنزیل و نرخ تورم، مقدار NPV بیشتر از حالتی است که تنها نرخ تنزیل در نظر گرفته شود و با در نظر گرفتن ارزش اسقاطی اجزا، مقدار باز پرداخت ماهانه و سالانه در بهره ساده و محاسبه شد.

کلمات کلیدی: انرژی، انرژی، تولید همزمان، تحلیل اقتصادی، تحلیل ریسک

مقالات

S. M. Miri, M. Chahartaghi, and S. M. Hashemian, “Thermodynamic, Risk and Reliability Modeling of a Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) with miscellaneous inlet fuel factors consideration,” in 10th Iranian Fuel cell Seminar, Faculty of Science, Shahid Rajae Teacher Training University, 2019

فهرست عناوین

فصل اول ۱

مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۲-۱ بررسی سیستم‌های تولید همزمان ۵

۳-۱ مقدماتی بر سیستم‌های تولید همزمان ۵

۴-۱ تجهیزات و قسمت‌های اصلی سیستم‌های تولید همزمان ۷

۱-۴-۱ محرک اولیه ۷

۱-۴-۱-۱ موتورهای رفت و برگشتی [۷] ۸

۲-۴-۱ توربین‌های گاز ۹

۳-۴-۱ میکروتوربین ۱۰

۴-۴-۱ توربین‌های بخار ۱۱

۵-۴-۱ پیل‌های سوختی ۱۲

۲-۴-۱ تجهیزات الکتریکی ۱۸

۳-۴-۱ دستگاه‌های بازیافت حرارت ۱۸

۴-۴-۱ تجهیزات سرمایشی ۱۸

۱-۴-۴-۱ چیلر جذبی ۱۸

۱-۴-۴-۲ چیلرهای تراکمی: ۱۹

۵-۱ جمع بندی ۱۹

فصل دوم ۲۱

مروری بر کارهای پیشین ۲۱

۲۲	۲-۱ کلیات
۲۲	۲-۲ مقدمه
۲۲	۳-۲ تحقیقات کلی صورت گرفته براساس سیستم‌های تولید همزمان
۲۵	۴-۲ تحقیقات صورت گرفته بر اساس پیل سوختی
۲۹	۵-۲ معرفی پژوهش حاضر

فصل سوم ۳۱

معادلات حاکم بر سیکل ۳۱

۳۲	۱-۳ پیشگفتار
۳۲	۲-۳ فرضیات
۳۲	۳-۳ مقدمه
۳۳	۴-۳ پیل سوختی کربنات مذاب
۳۳	۱-۴-۳ تحلیل قانون اول برای پیل سوختی کربنات مذاب
۳۵	۲-۴-۳ تحلیل قانون دوم پیل سوختی کربنات مذاب
۳۶	۳-۴-۳ تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم تولید همزمان
۳۸	۵-۳ چیلر جذبی
۳۸	۱-۵-۳ تحلیل قانون اول چیلر جذبی
۴۰	۲-۵-۳ تحلیل قانون دوم چیلر جذبی
۴۱	۶-۳ چیلر تراکمی
۴۳	۲-۶-۳ تحلیل قانون دوم برای چیلر تراکمی هوا خنک
۴۳	۷-۳ راندمان انرژی

۴۴	۸-۳ راندمان آگزرژی
۴۴	۹-۳ بررسی اقتصادی سیستم
۴۴	۱-۹-۳ متد نرخ‌های بهره
۴۵	۲-۹-۳ متد بازگشت سرمایه
۴۶	۳-۹-۳ متد ارزش حال و ارزش کل سرمایه‌گذاری در پایان عمر پروژه
۴۶	۴-۹-۳ متد فاکتور تنزیل
۴۶	۵-۹-۳ متد فاکتور تورم
۴۷	۶-۹-۳ متد ارزش پول خالص
۴۷	۷-۹-۳ متد ارزش کل سیستم پس از پایان عمر

فصل چهارم ۴۹

بحث و نتایج ۴۹

۵۰	۱-۴ مقدمه
۵۰	۲-۴ آرایش سیکل
۵۱	۳-۴ پارامترهای ورودی به اجزا سیستم
۵۱	۱-۳-۴ پیل سوختی
۵۲	۲-۳-۴ چیلر جذبی
۵۲	۱-۲-۳-۴ اعتبار سنجی چیلر جذبی:
۵۳	۲-۲-۳-۴ مقادیر ورودی به چیلر جذبی
۵۳	۳-۳-۴ چیلر تراکمی
۵۳	۱-۳-۳-۴ اعتبار سنجی چیلر تراکمی
۵۴	۲-۳-۳-۴ مقادیر ورودی به چیلر تراکمی
۵۴	۴-۴ پارامترهای خروجی از سیستم

۵۴	۱-۴-۴ پیل سوختی
۵۵	۲-۴-۴ نتایج خروجی چیلر جذبی
۵۶	۳-۴-۴ نتایج خروجی چیلر تراکمی
۵۷	۵-۴ تحلیل انرژی و انرژی و انرژی
۷۱	۶-۴ تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان پیل سوختی کربنات مذاب
۷۵	۷-۴ تحلیل اقتصادی سیستم

فصل پنجم نتیجه گیری ۸۱

۸۲	۱-۵ مقدمه
۸۲	۲-۵ نتیجه گیری انرژی
۸۳	۳-۵ نتیجه گیری انرژی
۸۳	۴-۵ نتیجه گیری تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم تولید همزمان
۸۴	۵-۵ نتیجه گیری اقتصادی
۸۴	۶-۵ نتیجه گیری کلی
۸۵	۷-۵ پیشنهادات
۸۶	منابع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): شماتیکی از یک سیستم تولید همزمان [۳] ۵
- شکل (۲-۱): نمونه‌های از موتور رفت و برگشتی [۹] ۹
- شکل (۳-۱): نمایی از یک توربین گاز [۱۲] ۱۰
- شکل (۴-۱): نمونه‌های از یک میکرو توربین برای مصرف خانگی [۱۵] ۱۱
- شکل (۱-۲)، سیکل پیشنهادی پژوهش حاضر ۳۰
- شکل (۱-۳): نمونه عملکرد چیلر جذبی [۵۸] ۳۸
- شکل (۲-۳): نحوه عملکرد چیلر جذبی تک اثره ۳۹
- شکل (۱-۴)، تغییرات ولتاژ بر حسب تغییرات جریان پیل سوختی ۵۷
- شکل (۲-۴)، تغییرات بازده انرژی و انرژی CHP بر حسب دما پیلسوختی ۵۸
- شکل (۳-۴)، تغییرات توان تولیدی و تخریب انرژی پیل سوختی براساس تغییرات دما ۵۸
- شکل (۴-۴)، نمودار بازده انرژی در حالت استفاده از برق و حرارت و فاکتور M در مقابل سوخت ورودی ۵۹
- شکل (۵-۴)، تغییرات بازده انرژی و فاکتور M در مقابل مقدار مصرف ضریب کاتد ۶۰
- شکل (۶-۴)، تغییرات فاکتور M و بازده انرژی سیستم در حالت CHP با تغییر ضریب فاکتور هیدروژن ۶۱
- شکل (۷-۴)، تغییرات بازده انرژی و انرژی الکتریکی در مقابل تغییرات دما پیلسوختی ۶۱
- شکل (۸-۴)، تغییرات بازده انرژی الکتریکی و فاکتور M در مقابل تغییرات دما ۶۲
- شکل (۹-۴)، تغییرات Q_e و cop در مقابل افزایش گرمای ورودی به ژنراتور در چیلر جذبی ۶۳
- شکل (۱۰-۴)، نمودار ضریب عملکرد و تخریب انرژی چیلر جذبی در مقابل بازده مبادله‌گر ۶۴
- شکل (۱۰-۴)، بررسی ضریب عملکرد و برودت خرجی از اواپراتور بر حسب تغییر دمای خروجی از ژنراتور ۶۴
- شکل (۱۱-۴)، نمودار تغییر برودت اواپراتور بر حسب تخریب انرژی سیکل چیلر جذبی تک اثره ۶۵
- شکل (۱۲-۴)، نمودار تغییر برودت خروجی از اواپراتور بر اساس توان ورودی به چیلر تراکمی ۶۶

- شکل (۴-۱۳)، مقایسه ضریب عملکرد و برودت خروجی براساس تغییر بازده ایزنتروپیک کمپرسور..... ۶۶
- شکل (۴-۱۴)، تغییرات اثر بازده ایزنتروپیک چیلر تراکمی بر روی تخریب انرژی چیلر..... ۶۷
- شکل (۴-۱۵)، اثر کار ورودی به چیلر تراکمی بر روی تخریب انرژی چیلر..... ۶۸
- شکل (۴-۱۶)، نمودار تغییرات بازده انرژی سیکل در حالت استفاده از جذبی و چیلر تراکمی-جذبی..... ۶۹
- شکل (۴-۱۷)، مقایسه کار و حرارت خروجی براساس سوخت ورودی..... ۶۹
- شکل (۴-۱۸)، اثر دما بر روی بازده انرژی سیستم..... ۷۰
- شکل (۴-۱۹) صحت استفاده از Weibull Distribution..... ۷۲
- شکل (۴-۲۰)، نمودار ساعت کارکرد پیل سوختی بر حسب تعداد دفعات خرابی..... ۷۴
- شکل (۴-۲۱)، نمودار ساعت کارکرد پیل سوختی بر حسب احتمال کارکرد پیل به طور موفق..... ۷۵

فهرست جداول

- جدول (۱-۱): خلاصه‌های از کارکرد موتورهای رفت و برگشتی [۸]..... ۸
- جدول (۲-۱) عملکرد توربین گاز با ظرفیتهای مختلف [۱۱]..... ۱۰
- جدول (۳-۱) برخی از مشخصات میکروتوربین [۱۴]..... ۱۱
- جدول (۴-۱) عملکرد توربین بخار با ظرفیت های مختلف [۱۶]..... ۱۲
- جدول (۵-۱): خلاصه محرکهای اولیه [۲۱]..... ۱۷
- جدول (۱-۴) پارامترهای ورودی به پیل سوختی..... ۵۱
- جدول (۲-۴) مقادیر ورودی جهت اعتبارسنجی چیلر جذبی [۶۵]..... ۵۲
- جدول (۳-۴) نتایج حاصل از اعتبارسنجی چیلر جذبی تک اثره..... ۵۲
- جدول (۴-۴) پارامترهای ورودی به چیلر جذبی تک اثره..... ۵۳
- جدول (۵-۴) مقادیر ورودی به چیلر تراکمی هوا خنک [۶۶]..... ۵۳
- جدول (۶-۴) مقادیر خروجی اعتبارسنجی چیلر تراکمی..... ۵۴
- جدول (۷-۴) پارامترهای ورودی به چیلر تراکمی هواخنک..... ۵۴
- جدول (۸-۴) نتایج خروجی از پیل سوختی کربنات مذاب..... ۵۵
- جدول (۹-۴) پارامترهای خروجی چیلر جذبی تک اثره لیتیوم برماید..... ۵۵
- جدول (۱۰-۴) نتایج چیلر تراکمی هوا خنک..... ۵۶
- جدول (۱۱-۴) آنتروپی نقاط مختلف سیکل چیلر تراکمی..... ۵۶
- جدول (۱۲-۴) خلاصه بازدههای محاسبه شده..... ۷۰
- جدول (۱۳-۴) محاسبات تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم..... ۷۳
- جدول (۱۴-۴) بررسی هزینههای ثابت و متغیر..... ۷۵
- جدول (۱۵-۴) مخارج و هزینههای سرمایه‌های از راه اندازی..... ۷۶

جدول (۴-۱۶)، بررسی پارامتر بازگشت سرمایه و ارزش پول سرمایه‌گذاری شده ۷۶

جدول (۴-۱۷)، محاسبه نرخ بهره ساده و مرکب هنگام دریافت وام ۷۷

جدول (۴-۱۸)، بررسی نرخهای تنزیل و تورم ۷۸

جدول (۴-۱۹)، محاسبه ارزش حال خالص پول ۷۹

علائم و اختصارات

Q	حرارت (Kw)	A	سطح فعال (m^2)
R	مقاومت (Ω)	AS	سود سالانه (\$)
s	آنتروپی ($\frac{Kj}{kg.K}$)	CC	هزینه سرمایه‌ای (\$)
t	متغیر زمان (h)	COP	ضریب عملکرد (-)
T	دما (K)	C	ظرفیت گرمایی ($\frac{J}{g.K}$)
TRV	ارزش بازپرداخت (\$)	E_{nerst}	ولتاژ نرست (v)
U	فاکتور مصرف (-)	E[N(t)]	تعداد خرابی (-)
v	ولتاژ (V)	Ex	اگزرژی (Kw)
W	توان (Kw)	f(t)	تابع توزیع (-)
اختصارات یونانی		F(t)	تابع توزیع تجمعی (-)
η	بازده (-)	FV	ارزش آتی پول (\$)
ξ	پارامتر شکل (-)	h(t)	تابع هازارد (-)
زیر نویس‌ها		F	ثابت فارادی ($\frac{C}{mol}$)
0	حالت مرده	h	آنتالپی ($\frac{Kj}{Kh}$)
1, 2, 3 ..	نقاط سیکل	IR	نرخ بهره (/)
Act	فعال سازی	j	جریان ($\frac{mA}{cm^2}$)
an	آند	LV	ارزش وام اولیه (\$)
ca	کاتد	LHV	ارزش حرارتی پایین ($\frac{Kj}{kg}$)
e	الکترون	\dot{m}	دبی جرمی ($\frac{kg}{s}$)
Comp	کمپرسور	M	فاکتور M (-)
Cond	کندانسور	MTTF	متوسط زمان اولین خرابی (h)
Ch	شیمیایی	N	تعداد سل‌ها (-)
d	ژنراتور	NPV	ارزش خالص حال پول (\$)
des	تخریب	n	تعداد مول‌ها (-)
elec	الکتریکی	P	فشار (Kpa)
eva	اواپراتور	p	زمان بازپرداخت (year)

h	بالا
in	ورودی
o	خروجی
Ph	فیزیکی
s	آیزنتروپیک
net	خالص
Th	ترمودینامیکی
VCRC	چیلر تراکمی

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

بر اساس آمارهای داده شده از اداره اطلاعات وزارت انرژی ایالات متحده، در بسیاری از کشورها ۳۶٪ کل مصرف انرژی مربوط به ساختمان‌ها و حدود ۳۰٪ انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد. به خصوص در چین، مصرف انرژی در ساختمان با نرخ رشد سالانه بیش از ۱۰ درصد همراه با رشد سریع اقتصاد است [۱].

انرژی نقش ویژه‌ای در رشد اقتصادی، رفاه اجتماعی، بهبود کیفیت زندگی و امنیت یک جامعه ایفا می‌کند. پژوهش‌های جهانی نشان می‌دهند میان توسعه ی یک کشور و میزان انرژی مصرفی آن، رابطه‌ی مستقیمی برقرار است و از این رو دسترسی کشورهای در حال توسعه به انواع منابع جدید انرژی، به منظور پیشرفت و بهبود وضع اقتصادی آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد.

این امر نیازمند تنظیم و بهینه نمودن استراتژی مصرف انرژی، استفاده از سیستم‌ها و دستورالعمل‌ها در جهت کاهش میزان مصرف انرژی بر واحد محصول و کاهش یا ثابت نگه داشتن هزینه‌های کل تولید است [۲].

منابع سوخت‌های فسیلی از جمله نفت، گاز و ذغال و آلودگی‌های ناشی از آنان به ترتیب در حال کاهش و افزایش هستند. از طرفی افزایش روز افزون جمعیت به آلودگی کره زمین دامن می‌زند. به همین علت مهندسان سراسر دنیا در حال یافتن راهی جهت کاهش آلودگی محیط زیست همراه با عدم کاهش نیاز انرژی روزمره هستند. یکی از این سیستم‌ها که جامعه بشری دیدگاهی بلند مدت و چشم انداز روشنی دارد، سیستم‌های تولید همزمان، برق، حرارت و سرما است^۱. این سیستم‌ها راه‌حلی جدید برای برطرف کردن مشکلات نیاز انرژی بشریت نظیر الایندگی‌های زیست محیطی، افزایش شدید تقاضای سرما و یا حرارت و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی می‌باشد. سیستم‌های تولید همزمان اصولاً جهت تأمین نیاز انرژی الکتریکی در محل طراحی شده اند و با تولید الکتریسیته مقداری حرارت از خود به جای می‌گذارند. جهت افزایش بازده سیستم این گرما را باید به گونه‌ای استفاده کرد که مقداری از آن جهت تأمین آب گرم مصرفی محلی و مقداری جهت تولید سرما وارد

^۱ Combined Cooling, Heating and Power (CCHP)

یک چیلر جذبی شود و برودت تولید کند. با این روش عملاً از اتلاف حرارتی جلوگیری شده است. سیستم‌های مذکور میتوانند در محل‌های صنعتی از جمله کارخانجات، شرکت‌های بزرگ تولید قطعات صنعتی ساختمان-های مسکونی و تجاری، بیمارستان‌ها، نیروگاه‌ها و غیره استفاده شوند. این سیستم‌ها دارای محرک‌های اولیه مختلفی از جمله موتورهای احتراق داخلی و خارجی، پیل‌های سوختی و یا توربین‌ها باشند که هر کدام با توجه به نیاز مقدار انرژی مورد نیاز در محل طراحی می‌شوند و با توجه به نیاز کاربردی محرک مورد نظر انتخاب می‌شود. روش کار این سیستم‌ها بدین شکل است که این سیستم‌ها از گرمای اتلافی برای سرمایش و گرمایش استفاده می‌کنند و با استفاده از گرمای اتلافی راندمان سیستم به مراتب افزایش پیدا می‌کند. به‌طور کلی خصوصیات سیستم‌های CCHP را میتوان در چند مورد خلاصه کرد.

- افزایش بازده انرژی

در واحدهای CCHP، تلفات به حداقل می‌رسد. راندمان کلی این واحدها بین ۸۰ تا ۹۵ درصد خواهد بود؛ این در حالیست که در یک نیروگاه متداول موتور احتراقی گازی، بازده نیروگاه بین ۳۰ تا ۴۰ درصد و در نیروگاه متداول توربین گازی، بازده نیروگاه بین ۲۰ تا ۳۰ درصد برآورد می‌شود.

- تامین حرارت مطمئن و انعطاف پذیری

با توجه به این که واحدهای تولید همزمان برق و گرما از حرارت تولیدی نیروگاه‌ها استفاده می‌کنند، تولید انرژی حرارتی در آن‌ها بدون وقفه انجام می‌شود. هم چنین میزان تولید برق و حرارت با توجه به تقاضای آن‌ها قابل تغییر است.

- محیط زیست

راندمان بالای واحدهای تولید همزمان باعث مطرح شدن این واحدها به عنوان راه حلی مناسب برای تبدیل انرژی شده است؛ همچنین بازدهی بالای این واحدها باعث می‌شود تولید دی‌اکسید کربن و سایر آلاینده‌ها نظیر ترکیبات گوگردی و اکسیدهای نیتروژن کاهش یابد. از سوی دیگر در کشورهایی که قوانین سخت

گیرانه‌ی زیست محیطی در آن‌ها اعمال می‌شود با کاهش تعداد واحدهای تبدیل سوخت به حرارت مفید، کنترل واحدهای تولید آلاینده راحت تر انجام خواهد پذیرفت.

- هزینه‌های پایین تر

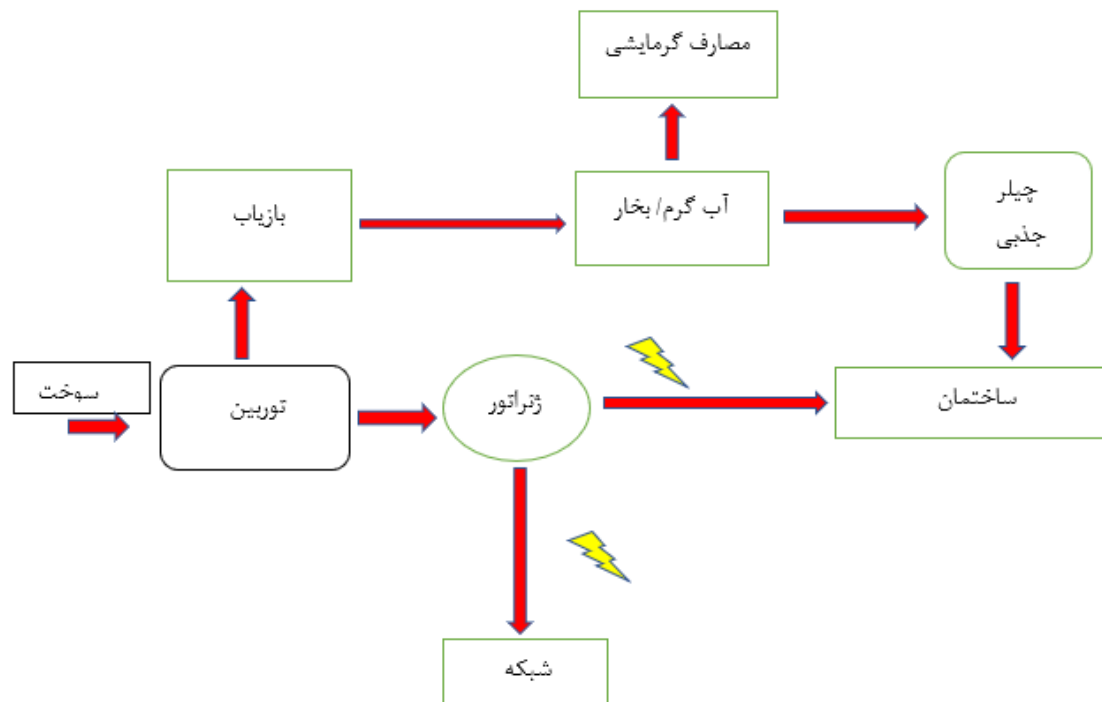
در توجیه پذیری واحدهای CHP باید محدودیت‌های مالی را به دقت لحاظ نمود. لازم است در هر ناحیه، انرژی‌های رقیب با واحدهای تولید همزمان مقایسه و تصمیم‌گیری به دقت انجام پذیرد. هزینه‌های متوسط تبدیل یک واحد انرژی در واحدهای CHP کمتر از سایر روش‌هاست.

- استفاده هر چه بیشتر از فضای ساختمان‌ها

با استفاده از واحدهای تولید همزمان عملاً تجهیزات نصب شده در تاسیسات گرمایشی ساختمان‌ها کاهش می‌یابد؛ به همین دلیل فضای بیشتری در ساختمان‌ها قابل استفاده خواهد بود.

- هزینه‌های پایین تر تعمیرات و نگهداری

با توجه به این که برای استفاده از حرارت تولیدی در یک واحد تولید همزمان، تجهیزات کمتری در هر ساختمان مورد نیاز است به تبع آن هزینه‌های تعمیرات و نگهداری تجهیزات نیز کمتر خواهد شد. در شکل (۱-۱) نیز نمونه‌ای از یک سیستم تولید همزمان نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱-۱)، مقداری مشخص سوخت وارد یک توربین شده و انرژی خروجی وارد یک ژنراتور می‌شود که الکتریسیته خروجی آن وارد ساختمان یا شبکه توزیع برق می‌شود. از طرفی سیستم مذکور با تولید توان مقداری حرارت آزاد می‌کند که این حرارت باید به گونه‌ای استفاده شود. این حرارت را می‌توان با عبور دادن سیال از سیستم به دست آورد.



شکل (۱-۱): شماتیکی از یک سیستم تولید همزمان [۳]

۲-۱ بررسی سیستم‌های تولید همزمان

تولید همزمان قدرت، سرمایش و گرمایش عملاً تولید پی در پی سه نوع انرژی که از یک منبع سوخت می‌گیرد انجام می‌شود. در بیشتر این سیستم‌ها انرژی شیمیایی به قدرت و حرارت تبدیل شده و انرژی حرارتی برای گرمایش و سرمایش بکار می‌رود.

۳-۱ مقدمه‌ای بر سیستم‌های تولید همزمان

در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی در حوزه سیستم‌های CCHP انجام شده است و این بررسی‌ها مدام در حال افزایش هستند. این مطالعات انجام شده در کل نشان دهنده توانایی بالای این نوع سیستم‌ها در زمینه تولید همزمان می‌باشد و مزایا و کاربردهای بسیاری را نشان می‌دهد. این موجب افزایش کاربرد سیستم‌های تولید همزمان شده است. بیش از ۱۱٪ از انرژی برق تولیدی در کشورهای گروه ۸ و همچنین کشورهای چین، برزیل، مکزیک، هند و آفریقای جنوبی در سال ۲۰۰۸ از طریق سیستم‌های تولید بدست آمده است. باید انتظار

داشت که این مقدار انرژی در سال ۲۰۱۵ به بیش از ۱۵٪ و در سال ۲۰۳۰ به بیش از ۲۴٪ برسد. همچنین انتظار می‌رود میزان برق تولیدی توسط سیستم‌های CCHP تا سال ۲۰۵۰ به چهارصد و سی گیگاوات و تا سال ۲۰۳۰ به ۸۳۰ Gw برسد [۴].

همچنین سیستم‌های تولید همزمان یکی از روش‌های بهبود استفاده از انرژی اولیه همراه با کاهش مصرف انرژی و کاهش آلودگی می‌باشد [۵]. سیستم‌های تولید همزمان اصولاً از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شوند:

- واحد تولید برودت یا سرمایش
- واحد تولید قدرت که با استفاده از یک محرک اولیه صورت می‌گیرد
- واحد گرمایش

همچنین فرایند تولید انرژی در سیستم‌های مذکور بدین گونه است که در ابتدا سوخت وارد واحد تولید قدرت می‌شود و قدرت مکانیکی حاصل شده از طریق ژنراتور برق تولید می‌کند. در اینجا در حین تولید قدرت مقداری حرارت آزاد شده که باید بازیافت حرارتی صورت گیرد. این مقدار حرارت به دو طریق قابل استفاده خواهد بود. اول اینکه از گرمای حاصله به عنوان نیاز گرمایشی مانند تهیه آب گرم و یا گرمایش منزل یا محلی استفاده شود و یا با استفاده از بخار، حرارت و یا آب گرم مستقیم انرژی مذکور وارد چیلر جذبی شود برودت حاصله جهت تهیه سرمایش مورد استفاده قرار گیرد. اگر سیستم‌های تولید همزمان به اندازه کافی انعطاف پذیر باشند به راحتی می‌توانند توسط کاربر مورد استفاده قرار گیرند بدین گونه که کاربر بتواند مقدار حرارت، برودت و یا قدرت را با توجه به نیاز فصلی تغییر دهد. یکی از نکات اصلی این سیستم‌ها انعطاف پذیری آن است که با پیشرفت علم می‌توان این عمل را بیشتر مورد دسترس قرار داد تا جامعه بشری جهت استفاده از این گونه سیستم‌ها ترغیب شود. سیستم‌های تولید همزمان در سال‌های اخیر به دلیل مزایای زیادی از جمله بالا بودن راندمان سیستم و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی در جامعه بشری مورد محبوبیت قرار گرفته‌اند [۶].

۴-۱ تجهیزات و قسمت‌های اصلی سیستم‌های تولید همزمان

سیستم‌های CCHP شامل چند نوع دستگاه اصلی و بسیاری اجزاء فرعی از دید کلی هستند. این اجزاء اصلی

شامل موارد زیر می‌شوند

- محرک‌های اولیه
- تجهیزات الکتریکی
- دستگاه‌های بازیافت حرارت
- چیلرهای جذبی

۱-۴-۱-۱ محرک اولیه

محرک‌های اولیه شامل دستگاه‌هایی هستند که انرژی سوخت را به قدرت محور چرخ دنده تبدیل کرده تا ژنراتورهای برقی را به حرکت درآورد. انواع محرک‌های اولیه را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

موتورهای رفت و برگشتی^۱، توربین‌های گاز^۲، پیل‌های سوختی^۳، توربین‌های بخار^۴، میکروتوربین‌ها^۵ و موتورهای استرلینگ^۶

جهت انتخاب یک محرک اولیه باید مواردی را مدنظر داشت

- مقدار نیاز بار الکتریکی با توجه به بازده برق خروجی محاسبه شود
- محل نصب سیستم‌های تولید همزمان دارای محدودیت‌هایی مانند میزان تولید آلودگی صوتی و گازهای گلخانه‌ای می‌باشد.
- ابعاد سیستم تولید همزمان برای انتخاب محل نصب باید بررسی شود

^۱ Reciprocating engines

^۲ Gas turbines

^۳ Fuel cells

^۴ Steam Turbines

^۵ Micro Turbines

^۶ Stirling Engines

- اگر محرک اولیه در ساعاتی از کار افتاد، باید جایگزینی برای محرک اولیه در نظر داشت
- نوع سوخت ورودی به سیستم تولید همزمان نقش بسزایی در تحلیل اقتصادی خواهد داشت
- ریسک و قابلیت اطمینان سیستم جهت کارکرد مداوم و تعداد خرابی‌های سیستم باید در نظر گرفته

شود

۱-۴-۱-۱ موتورهای رفت و برگشتی [۷]

موتورهای رفت و برگشتی یک تکنولوژی به‌روز برای تولید برق، حمل و نقل و بسیاری دیگر از اهداف دیگر است. این موتورها دارای ظرفیت نصب ۱۰ kw تا ۱۰Mw هستند. موتورهای رفت و برگشتی می‌توانند برای تولید ظرفیت بیش از ۱۰ مگاوات در واحد کارخانه یکپارچه شوند. موتورهای رفت و برگشتی برای سیستم‌های تولید همزمان و قدرت بسیار مناسب هستند و در مکان‌های صنعتی و تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در جدول (۱-۱) خلاصه‌ای از کلیت موتورهای رفت و برگشتی و در شکل (۱-۲) نمونه‌ای از این سیستم ارائه شده است.

جدول (۱-۱): خلاصه‌ای از کارکرد موتورهای رفت و برگشتی [۸]

محدودیت اندازه	در سایزهای ۱۰kw الی ۱۰Mw در دسترس هستند. بیشتر سیستم‌های تولید همزمان با استفاده از موتورهای رفت برگشتی ظرفیتی زیر ۵Mw دارند
حرارت خروجی	گرمای خروجی می‌تواند از آگزوز، عبور دادن آب گرم و یا با استفاده از روانکارها بازیابی شود در سیستم‌های تولید برودت استفاده شود.
عملیات بار/قدرت	موتورهای رفت و برگشتی در بارهای نیمه به‌خوبی کار می‌کنند و برای بارهای پایه بسیار مناسب است.
سوخت	این موتورها با استفاده از سوخت‌های متعددی کار می‌کنند. برای سیستم‌های تولید همزمان گاز طبیعی بسیار مناسب است.
قابلیت اطمینان	این موتورها دارای قابلیت اطمینان بالایی هستند.
بقیه موارد	دارای هزینه نصب پایین هستند و زمان راه‌اندازی آنان کم می‌باشد



شکل (۲-۱): نمونه‌ای از موتور رفت و برگشتی [۹]

در این موتورها برای کاربردهایی از جمله خودروهای سبک و سنگین، تجهیزات معدن مانند دستگاه‌های حفر تونل، ناوها، کشتی‌ها، و ناوگان‌های ریلی استفاده می‌شوند.

۲-۱-۴-۱ توربین‌های گاز

مبنای کار توربین‌های گاز از نظر ترمودینامیکی، بر اساس چرخه برایتون است که در آن، هوا به صورت فشرده شده، احتراق در فشار ثابت رخ داده و انبساط هوای فشرده و داغ در توربین، به صورت بی‌دررو رخ می‌دهد و هوا به فشار اولیه می‌رسد. با افزایش دمای هوای ورودی به توربین، بهره‌وری توربین‌های گاز افزایش می‌یابد. بنابراین، بهتر است که این دما هرچه بیشتر انتخاب شود. اما در این مورد از نظر تحمل مواد تشکیل‌دهنده محفظه احتراق و پره‌های توربین، محدودیت وجود دارد. بنابراین، در این قسمت‌ها که به آن‌ها بخش‌های داغ، گفته می‌شود، از مواد مقاوم به دماهای زیاد مانند سوپرآلیاژها استفاده می‌شود. همچنین این قسمت‌ها با استفاده از فناوری‌های پیچیده‌ای، خنک‌کاری می‌شوند [۱۰]. در جدول (۱-۲) عملکرد توربین گاز با ظرفیت‌های مختلف و در شکل (۱-۳) نمایی از یک توربین گازی نشان داده شده است.

جدول (۲-۱) عملکرد توربین گاز با ظرفیت‌های مختلف [۱۱]

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



شکل (۳-۱): نمایی از یک توربین گاز [۱۲]

۳-۱-۴-۱ میکروتوربین

میکرو توربین‌ها تکنولوژی تولید پراکنده جدید هستند که برای کاربری‌های تولید انرژی ثابت استفاده می‌شوند. میکرو توربین‌ها نوعی از توربین‌های احتراقی هستند که هم گرما و هم برق در ابعاد نسبتاً کوچک تولید می‌کنند [۱۳]. به دلیل داشتن اندازه کوچک، هزینه اولیه کمتر، هزینه‌های کمتر نگهداری و کنترل خودکار الکترونیکی، انتظار می‌رود که میکرو توربین‌ها سهمی زیادی از بازار را شامل شوند. در جدول (۳-۱)، برخی از مشخصات میکرو توربین به صورت خلاصه آورده شده است.

جدول (۳-۱) برخی از مشخصات میکروتوربین [۱۴]

محدوده اندازه	۲۵-۵۰۰ Kw
راندمان	٪۳۰-۲۰
سوخت	گاز طبیعی، دیزل، پروپان، هیدروژن
بقیه موارد	تولید همزمان

در شکل (۴-۱) نمونه‌ای از یک میکروتوربین نشان داده شده است.



شکل (۴-۱): نمونه‌ای از یک میکرو توربین برای مصرف خانگی [۱۵]

۴-۱-۴-۱ توربین‌های بخار

توربین بخار دستگاهی است که در آن سیال بخار عامل دوران روتور و ایجاد گشتاور و در نتیجه تولید توان الکتریکی می‌باشد. بخار سوپرهیت با درجه حرارت و فشار بالا که در بویلر تولید می‌شود وارد توربین مذکور می‌گردد. در جدول (۴-۱) عملکرد توربین بخار با ظرفیت‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول (۱-۴): عملکرد توربین بخار با ظرفیت های مختلف [۱۶]

مشخصات	واحد	میکروتوربین ۱	میکروتوربین ۲	میکروتوربین ۳
ظرفیت تولید قدرت	KW	۵۰۰	۳۰۰۰	۱۵۰۰۰
بازده حرارتی توربین	%	۵۰	۷۰	۸۰
بازده بویلر	%	۸۰	۸۰	۸۰
بازده الکتریکی	%	۶/۴	۶/۹	۹/۳
بازده کل سیستم	%	۷۹/۶	۷۹/۵	۷۹/۷

۱-۴-۱-۵ پیل های سوختی

پیل های سوختی تولید کننده قدرت و حرارت هستند. این سیستم ها حداقل الودگی صوتی را به دلیل عدم وجود دستگاه های مانند توربین درونی یا محرک داخلی هستند. پیل های سوختی تا زمانی که سوخت به آنها وارد شود در یک بازه زمانی طول عمر^۱، انرژی آنها مورد بهره برداری قرار خواهد گرفت [۱۷]. یکی از بهترین مزایای پیل های سوختی بازار رقابتی آنها می باشد که در آمریکا و کانادا این شرکت ها بیشتر به چشم می خورند. تولید الکتریسیته و گرما در پیل سوختی با استفاده از دو الکترود آند و کاتد^۲ که یون های شارژ را از یک الکترولیت عبور می دهند صورت می پذیرد. این فرآیند با به کار گیری یک کاتالیست تسریع می گردد. پیل های سوختی یکی از فناوری های تولید برق با بازدهی مناسب، تمیز و بدون سرصدا است. از آنجا که سوخت مورد استفاده توسط پیل سوختی در یک فعل انفعال اکتروشیمیایی مصرف شده و سوزانده نمی شود، لذا استفاده از سوخت موجب الایندگی هوا نمی شود. توسعه پیل های سوختی به عنوان یکی از گزینه های تولید برق برای آینده حدودا از چهل سال پیش شروع شده است، اما این فناوری به دلایلی مانند گرانی، پیچیدگی، ظرفیت کم و قابلیت اطمینان اثبات نشده هنوز نتوانسته است بازار تجاری عمده ای را به خود اختصاص دهد. البته مزایای پیل های سوختی از جمله منافع زیست محیطی به گونه ای است که در برخی از کشورها این نوع

^۱ Life Time

^۲ Anode and Cathode

فناوری مورد حمایت و تشویق دولت‌ها قرار گرفته است [۱۸]. در اینجا پس از ذکر انواع پیل سوختی به بررسی کلی پیل سوختی کربنات مذاب پرداخته می‌شود.

• پیل سوختی پلیمری

پیل سوختی پلیمری^۱ (PEMFC) 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 خلل دار نفوذ می‌کند و به سمت 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.

مزایا:

• دمای پایین و شروع به کار سریع

• عدم حساسیت به دی اکسید کربن

• امکان استفاده از گازهای مشتق از هیدروکربن به عنوان سوخت

• پیل سوختی قلیایی^۲ (AFC)

درجه حرارت کارکرد این پیل پایین بوده و بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. در این پیل 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 می‌کند.

^۱ Proton-exchange membrane fuel cells

^۲ Alkaline Fuel cell

مزایا:

✚ عدم نیاز به فلزات کمیاب

✚ بالا بودن راندمان

• پیل سوختی اسید فسفریک^۱ (PAFC)

پیل سوختی اسید فسفریک در دمای حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد از الکترولیت اسید فسفریک استفاده می‌کند و الکتروده پیل‌های سوختی اسید فسفریک از جنس پلاتین می‌باشد که بر روی سطح پودر کربن فعال نشانده شده است.

مزایا:

✚ توان تحمل ۱ تا ۲ درصد مونواکسید کربن

✚ امکان استفاده در تولید همزمان برق و حرارت

✚ ثبات الکترولیت در محیط الکتروشیمیایی

• پیل سوختی اکسید جامد^۲ (SOFC)

الکتروده آند ترکیبی از نیکل وزیرکینیا و الکتروده کاتد از جنس منگنیت لانتانیم است. درجه حرارت کارکرد پیل ۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد و الکترولیت جامد با الکترودها که از مواد متخلخل مخصوصی تشکیل شده‌اند پوشانده شده‌اند.

^۱ Phosphoric Acid Fuel Cell

^۲ Solid Oxid Fuel Cell

مزایا:

- ✚ عدم نیاز به هیدروژن خالص
- ✚ بالا بودن راندمان سیستم
- ✚ امکان استفاده مستقیم از گاز طبیعی بعنوان سوخت

• پیل سوختی متانولی^۱ (DMFC)

پیل سوختی متانولی در حقیقت یک پیل سوختی پلیمری است که قادر است متانول مایع را مستقیماً بعنوان سوخت مصرف کند. الکتروود آند از جنس آلیاژ پلاتین روتینیوم و الکتروود کاتد آن از جنس پلاتین است. این پیل سوختی در محدوده وسیعی از درجه حرارت کار می‌کند و دمای کارکرد آن بین ۶۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد است.

مزایا:

- ✚ قابلیت استفاده از متانول مایع بعنوان سوخت
- ✚ دما و فشار عملکردی پایین
- ✚ سادگی ساختار و مدیریت حرارت پیل

• پیل سوختی کربنات مذاب^۲ (MCFC)

در پیل سوختی کربنات مذاب 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 است.

^۱ Direct-methanol fuel cells

^۲

درجه حرارت کارکرد ۶۵۰ درجه سانتیگراد و جزء پیل‌های سوختی با دمای کارکرد بالا بشمار می‌آید. در آند، هیدروژن با این یون‌ها واکنش می‌دهد و دی‌اکسیدکربن، آب و الکترون تشکیل می‌دهد. الکترون‌ها توسط یک مدار خارجی از آند به کاتد منتقل می‌شود و برق تولید می‌کند. پیل‌های سوختی کربنات مذاب با کاتالیست‌های نیکلی بسیار خوب عمل می‌کنند. یکی از مزیت‌های نیکلی بودن کاتالیست می‌تواند به ارزان قیمت بودن آن اشاره کرد. پیل سوختی کربنات مذاب در مقایسه با پیل 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 دی‌اکسید کربن در کاتد، این مقدار را جبران شود. در این نوع پیل‌ها هیدروژن، دی‌اکسید کربن و بخار آب از سمت آند و دی‌اکسید کربن و اکسیژن از سمت دیگر وارد این دستگاه می‌شود و با توجه به دبی مولی گازهای ورودی و شرایط کاری سیستم، الکتریسیته تولید می‌شود [۱۹]. در این نوع پیل‌ها محفظه جمع‌آوری تک تک سل‌ها استک نامیده می‌شود (Stack) همچنین تفاوت پیل‌ها در نوع دمای کارکرد می‌باشد که هر نوع الکترولیت در دماهای مختلف کار می‌کنند.

مزایا:

✚ امکان بکارگیری در سیستم‌های تولید همزمان

✚ عدم استفاده از کاتالیست گران قیمت

✚ راندمان بالا

معایب:

✚ احتیاج به چرخه دی‌اکسید کربن

✚ هزینه نصب بالا

✚ زمان راه‌اندازی بالا

۱-۴-۱-۶ موتورهای استرلینگ

که به آن ماشین استرلینگ هم گفته می‌شود یک موتور حرارتی است که در سال ۱۸۱۶ توسط دکتر رابرت استرلینگ اختراع شد [۲۰]. موتور استرلینگ قابلیت بازدهی بیشتری نسبت به موتورهای بنزینی و دیزلی دارد اما امروزه موتورهای استرلینگ فقط در برخی کاربردهای خاص مانند زیردریایی‌ها یا ژنراتورهای کمکی در قایق‌ها استفاده می‌شود. چرخه استرلینگ از یک منبع حرارتی خارجی که می‌تواند هر چیزی از بنزین و انرژی خورشیدی تا حرارت ناشی از پوسیدگی گیاهان باشد استفاده کند و هیچ احتراقی داخل سیلندرهای موتور رخ نمی‌دهد. در جدول (۱-۵) خلاصه از محرک‌های اولیه آورده شده است.

جدول (۱-۵): خلاصه محرک‌های اولیه [۲۱]

نوع فناوری	مزایا	معایب	ظرفیت
موتورهای رفت و برگشتی	بازده بالا راه اندازی سریع سرمایه‌گذاری کم نیازمند فشار گاز کم	هزینه تعمیرات زیاد نیاز به خنک‌سازی الایندگی زیاد نویزهای فرکانس پایین به میزان زیاد	کمتر از ۵ مگاوات
توربین گاز	قابلیت اطمینان بالا الایندگی کم کیفیت بالای گرما عدم نیاز به خنک‌سازی	نیازمند فشار گاز بالا بازدهی کم کاهش بازدهی در صورت افزایش دمای محیط	۵۰۰ کیلووات الی ۲۵۰ مگاوات
توربین بخار	قابلیت اطمینان بالا بازدهی بالا استفاده از انواع سوخت طول عمر بالا	زمان راه‌اندازی بالا کم بودن نسبت برق به گرما	۵۰ کیلووات الی ۲۵۰ مگاوات
میکروتوربین	وزن کم عدم نیاز به خنک‌سازی ابعاد کوچک	هزینه بالا بازده کم نیازمند بازه دمایی کم	۳۰ الی ۲۵۰ کیلووات
پیل سوختی	الایندگی کم سر صد کم بازه دمایی کارکرد مختلف	هزینه بالا نیازمند سوخت مداوم نیازمند خنک‌سازی عدم بررسی قابلیت اطمینان سیستم	۵ کیلووات الی ۵ مگاوات

۱-۴-۲ تجهیزات الکتریکی

تجهیزات الکتریکی برای سیستم‌های تولید همزمان شامل اجزایی مانند: ترانسفورمرها، رله‌ها، خطوط انتقال و دیگر تجهیزات الکتریکی می‌باشد. همچنین در مواقع ضروری سیستم نیازمند برخی تجهیزات جهت اتصال سیستم به شبکه برق می‌باشد که در صورت عدم کارکرد به شبکه برق رسانی متصل شود [۲۲].

۱-۴-۳ دستگاه‌های بازیافت حرارت

حرارت خروجی از هر سیستم توسط خود سیستم و در غیر اینصورت توسط دستگاه‌های مخصوص حرارتی باید صورت گیرد. در بعضی از سیستم‌ها اگر طراحی سیستم به صورتی باشد که مجرای جهت ورود و خروج آب جهت خنک کاری سیستم وجود نداشته باشد از دستگاه‌های بازیافت حرارت استفاده می‌شود. در غیر این صورت، در اکثر این تجهیزات گاز خروجی از دستگاه عبور کرده و از بالای دستگاه خارج می‌گردد. انرژی گاز خروجی برای گرم کردن آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۴-۴ تجهیزات سرمایشی

تجهیزات سرمایشی در این بخش به چیلرهای جذبی و تراکمی تقسیم می‌شوند که به اختصار توضیح داده می‌شوند.

۱-۴-۴-۱ چیلر جذبی

چیلر جذبی با بهره‌گیری از بخار کم فشار، آب داغ و یا آب گرم، هزینه‌ی گزاف مصرف برق را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در سیستم‌های جذبی از کمپرسور گرمایی (شامل ژنراتور، ایزربر، پمپ و مبدل حرارتی) برای جوشش مبرد در محوطه‌ای از محلول لیتیم بروماید و فشرده سازی بخار مبرد در فشار بالا استفاده می‌شود. افزایش فشار مبرد، دمای تراکم را نیز افزایش می‌دهد و این یعنی بخار مبرد در دما و فشار بالاتر به مایع تبدیل می‌شود. از آنجایی که دمای تراکم بیشتر از دمای محیط است، حرارت از کندانسور به محیط منتقل می‌شود. مایع فشار بالا پس از عبور از یک دریچه فشارش تقلیل می‌یابد و با ادامه روند کاهش فشار نقطه جوش پایین می‌آید. سپس این مایع فشار پایین وارد اواپراتور شده و می‌جوشد. از آن جا که دمای

جوش اکنون پایین تر از دمای هوا است، حرارت از هوا به مبرد منتقل شده و مبرد می جوشد و خود هوا خنک می شود [۲۳].

بخار مبرد دوباره وارد ابزربر شده و در آنجا توسط لیتیم بروماید حرارتش گرفته و کندانس می گردد. لیتیم بروماید با جذب حرارت رقیق شده و به ژنراتور پمپ می شود؛ از آنجایی که این محلول نمی جوشد با افزودن حرارت، بخشی از محلول بخار شده و به راحتی از آن جدا شده و لیتیم بروماید خالص مجدد وارد ابزربر می شود و این روند همواره تکرار می گردد.

۲-۴-۴-۱ چیلرهای تراکمی:

سیستم‌هایی هستند که پس از دریافت قدرت، انرژی مذکور را به سرمایش تبدیل می کنند. بر این اساس این سیستم‌ها روزانه در حال استفاده در سیستم‌های تولید همزمان هستند.

۱-۵ جمع بندی

در این فصل مقدمه‌ای از انرژی مصرف انرژی و نگرانی‌های زیست محیطی بیان شد. سپس سیستم‌های تولید همزمان تشریح و انواع آن‌ها بررسی شدند. در قسمت آخر این فصل محرک‌های اولیه و قسمت‌های اصلی سیستم‌های تولید همزمان آورده شد در مورد نکات مثبت و منفی آن‌ها بحث شد. در فصل دوم کارهای پیشین صورت گرفته در مورد پیل سوختی تشریح خواهد شد.

فصل دوم

مروری بر کارهای پیشین

۱-۲ کلیات

در این فصل ابتدا تحقیقاتی در زمینه سیستم‌های تولید همزمان بررسی شده است. سپس نتایج مطالعات صورت گرفته در زمینه استفاده از پیل‌های سوختی در راستای تولید همزمان نقد و بررسی شده و در پایان پژوهش انجام شده در این بخش معرفی شده است.

۲-۲ مقدمه

در این قسمت به بررسی چندین مورد از پژوهش‌های انجام شده در حوزه سیستم‌های تولید پرداخته می‌شود.

۲-۳ تحقیقات کلی صورت گرفته براساس سیستم‌های تولید همزمان

وو و ونگ^۱ [۲۳]. یک سیستم تولید همزمان جهت توسعه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برخی از محرک‌های اصلی و فن‌آوری فعال حرارتی را نیز به طور خلاصه معرفی کردند. با توجه به مطالعه صورت گرفته از جانب آن‌ها، نتیجه بدین صورت بود که سیستم تولید همزمان می‌تواند ۷۰ الی ۹۰٪ بازده داشته باشد. این مقدار بازده از بازده سیستمی که به تنهایی برق و یا حرارت تولید می‌کند بیشتر است.

جهت کاهش مقدار حرارت و برودت مورد نیاز دانشگاه استوارت ایتالیا باید طرحی به دولت ایتالیا داده می‌شد که ساختمان مذکور بدون نیاز به تعمیر اساسی ساختمان مقداری از انرژی مصرفی این ساختمان کاسته شود. پیسلو و کاستالدو^۲ [۲۴] با بررسی طرح جایگذاری کاشی‌های خاصی که نیاز به تعمیر اساسی نداشت با کاشی‌های قدیمی این طرح را عملی کردند. همچنین با استفاده از سیستم زمین گرمایی در زمستان و تابستان به ترتیب ۶۴ و ۶۹٪ از انرژی مورد نیاز ساختمان را کاهش دادند.

^۱ Wu and Wang

^۲ Pisello and Castaldo

کاردنا و همکاران^۱ [۲۵] یک روش نو جهت بهینه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان با در نظر گرفتن خصوصیات فنی اجزا معرفی کردند. این سیستم بر اساس مدیریت تقاضای حرارتی و برق بود [۲۶].

در پژوهشی دیگر ماگو و چامرا^۲ [۲۷] یک سیستم تولید همزمان را با اولویت تولید برق و حرارت به صورت جداگانه را ارزیابی و بهینه‌سازی کردند. آن‌ها ارزیابی عملیاتی، اقتصادی و تولید گازهای گلخانه‌ای را انجام دادند.

در سال ۲۰۰۴ کاو و لیو^۳ [۲۸] عملکرد سیستم تولید همزمان سرمایش، قدرت و حرارت یک ساختمان را با استفاده از روابط و بررسی‌های ترمودینامیکی بر پایه شبیه‌سازی و طراحی بهینه‌سازی سیستم را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها از دو تابع هدف راندمان انرژی و سود ناخالص کل در بهینه‌سازی استفاده کردند. نتایج نشان داد که اگر نرخ بار به اندازه کافی بالا باشد، استفاده از این سیستم مزایای زیادی دربر خواهد داشت.

در تحقیقی دیگر، چیکو و همکاران^۴ [۲۹] آنالیز اقتصادی بر روی سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه موتور احتراق داخلی را انجام دادند. آن‌ها شش طرح مختلف را برای تولید سرما را باهم مقایسه کردند. نتایج آن‌ها یک تصویر منطقی برای مقایسه راه‌حل‌های مختلف ارائه کرد. همچنین آن‌ها اثر نوسانات قیمت گاز و برق را با توجه به بازگشت سرمایه مورد ارزیابی قرار دادند.

کونگ و همکاران^۵ [۳۰] راندمان انرژی و اقتصادی یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه را با محرک اولیه موتور استرلینگ را با یک سیستم متداول مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در صورت استفاده از سیستم تولید همزمان همراه با محرک اولیه موتور استرلینگ ۳۳٪ از انرژی اولیه نسبت به سیستم متداول صرفه‌جویی خواهد شد.

^۱ Cardona

^۲ Mago and Chamra

^۳ Cao and Liu

^۴ Chicco and Mancarella

^۵ Kong et al

بررسی سیستم تولید همزمان از نقطه نظر آلودگی زیست محیطی می‌تواند یک ارزیابی مهم تفسیر شود. بر همین اساس چهارطاقی و شیخی در سال ۲۰۱۸ [۳۱] جهت کاهش مصرف انرژی سوخت و آلودگی زیست محیطی یک سیستم تولید همزمان برای تاسیسات ساختمان بر پایه محرک اولیه موتور استرلینگ را مورد ارزیابی قرار دادند. موتور استرلینگ مورد مطالعه آن‌ها ادیاباتیک غیر ایده‌آل بود. نتایج ارزیابی حاکی از آن بود که بازده الکتریکی و تولید همزمان به ترتیب $27/3\%$ و 74% می‌باشد. همچنین در این شرایط، مصرف سوخت و انتشار گاز کربن دی‌اکسید در مقایسه با سیستم متداول تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت.

احمدی و همکاران [۳۲] پژوهشی بر روی موتور استرلینگ ایده‌آل انجام دادند. تحقیقات صورت گرفته بر اساس قانون اول و دوم ترمودینامیک بنا بود. آن‌ها دو تابع هدف قدرت خروجی و بازده حرارتی را حداکثر و تولید آنتروپی نسبت به جرم گاز ایده‌آل را حداقل کردند.

در تحقیقی دیگر شیخی و همکاران [۵] یک سیستم تولید همزمان بر اساس موتور استرلینگ را تجزیه و تحلیل کردند. سیستم مذکور از دیدگاه‌های انرژی، انرژی، مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ی دی‌اکسید کربن مورد مطالعه قرار گرفت. یکی از نتایج مطالعه انجام شده حاکی از آن بود که ضریب چیلر، قدرت خروجی، گرمای اتلافی و تخریب انرژی در دوره‌های بالا به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

لیو و همکاران^۱ [۳۳] نوعی استراتژی کاری را برای عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی تولید همزمان در بارهای جزئی مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آن‌ها حرارت گازهای احتراق به صورت جزئی در مولد بخار بازیاب، بازیابی می‌شود و با تنظیم پره‌های ورودی توربین عملکرد توربین را برای بار جزئی را تنظیم کرده و کارایی سیستم را افزایش می‌دهند. نتایج حاصل بر آن بود که استراتژی جدید کارایی نیروگاه را در بار جزئی تا $1/2\%$ افزایش می‌دهد و انتشار گاز دی‌اکسید کربن را تا $13/8$ کیلوگرم بر مگاوات ساعت کاهش می‌دهد.

^۱ Liu et al

در پژوهشی بر اساس تحلیل ترمودینامیکی، داولین و شیفی^۱ [۳۴] یک سیستم تولید همزمان را در بیمارستانی در شانگهای را مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه آنالیز انرژی و بهینه سازی سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه توربین گاز انجام شد.

ابراهیمی و سلیمان‌پور [۳۵] یک سیستم تولید همزمان متشکل از یک میکروتوربین گازی، چیلر جذبی و یک مخزن ذخیره‌سازی حرارت را شبیه‌سازی کردند. نتیجه کار آن‌ها نشان داد ضریب عملکرد چیلر تا ۰/۶۳ و ذخیره سازی انرژی اولیه تا مقدار ۰/۳۵٪ قابل دستیابی می‌باشد.

فرچیلد و همکاران^۲ [۳۶] یک سیستم تولید همزمان را بر اساس عملکرد تجربی و تحلیلی بر پایه محرک اولیه میکروتوربین را مورد تجزیه تحلیل قرار دادند.

کارسانا و همکاران^۳ [۳۷] یک پژوهش آزمایشگاهی سیستم تولید همزمان بر اساس میکروتوربین ۱۰۰ کیلو-وات را انجام دادند. نتایج خروجی این مطالعه نشان داد که در ازای توان خروجی ۸۰ کیلووات بازدهی الکتریکی، سیکل ۰/۲۹/۵٪ و در ازای توان خروجی ۴۰ کیلو-وات بازدهی الکتریکی سیکل ۰/۲۳/۵٪ خواهد بود

۲-۴ تحقیقات صورت گرفته بر اساس پیل سوختی

هندرسن^۴ [۳۸] یک سیستم تولید همزمان بر اساس یک پیل سوختی مدل‌سازی کرد. در این پژوهش یک ساختمان هم مورد ارزیابی و شبیه سازی قرار گرفت. نتایج بر این اساس استوار بود که عملکرد سیستم قابل پیش‌بینی است.

سیفرت^۵ [۳۹] یک سیستم تولید همزمان را مورد بررسی قرار داد. سیستم مذکور متشکل از یک پیل سوختی، چیلر جذبی و ذخیره ساز الکتریکی بود. نتایج نشان داد که راندمان الکتریکی سیستم پایین بود.

^۱ Daolin and Shifei

^۲ Fairchild et al

^۳ Caresana et al

^۴ Henderson

^۵ Seifert

چن و همکاران^۱ [۴۰] یک سیستم تولید قدرت با پیل سوختی اکسید جامد را مورد بررسی قرار دادند. سیستم آن‌ها از هیدروژن تغذیه می‌کرد. نتایج آنالیز آن‌ها نشان داد که اگر سیستم مذکو با متان تغذیه شود دارای راندمان بالاتری است نسبت به حالتی که سیستم از هیدروژن تغذیه کند.

در تحقیقی دیگر چهارطاقی و علی‌زاده [۴۱] یک سیستم تولید همزمان بر اساس پیل سوختی پلیمری را مورد ارزیابی قرار دادند. تحلیل آن‌ها بر پایه انرژی و انرژی استوار بود. با توجه به پژوهش انجام شده نتایج نشان داد که با افزایش فشار کاری پیل سوختی راندمان انرژی و انرژی افزایش میابد قدرت و حرارت خروجی از پیل مذکور به ترتیب $۳۸/۶۳$ و $۳۹/۱۷$ کیلووات بود.

مهرپویا و همکاران [۴۲] یک سیستم تولید همزمان را بر اساس پیل سوختی کربنات مذاب مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. مقداری از گرمای خروجی پیل مورد بررسی وارد یک موتور استرلینگ شد و قدرت خروجی سیستم را افزایش داد. در این سیستم از یک محفظه احتراق سوختی^۲ استفاده شد که وظیفه‌اش سوزاندن سوخت‌هایی است که به طور کامل سوزانده نشده است. نتایج مورد بررسی نشان داد که بیشترین نرخ تخریب انرژی مربوط به پیل سوختی است.

احمدی و همکاران [۴۳] بهینه‌سازی عملکرد چند هدفه موتور گرمایی برای تون و پیل سوختی کربنات مذاب بازگشت ناپذیر را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. یکی از متغیرهای تصمیم آن‌ها جریان پیل سوختی بود. مطالعه آن‌ها شامل سه سناریو از بهینه‌سازی تابع چند هدفه بود. آن‌ها آنالیز حساسیت راه‌حل بهینه نهایی پارامترهای موثر در طراحی سیستم هیبرید پیل سوختی و موتور گرمایی را بررسی کردند.

ایندرانیل و همکاران^۳ [۴۴] پیل سوختی کربنات مذاب همراه با ریفورمر خارجی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. گرمای خروجی از پیل جهت استفاده از چیلر جذبی و قدرت خروجی آن جهت استفاده در ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. منزل مورد بررسی یک ساختمان ۱۰ نفره بود که آنالیز آن‌ها برای یک خانواده چهار نفره

^۱ Chen et al

^۲ Duct Burner

^۳ Indraneel et al

انجام شد. نتایج حاصل بیان کرد که گرمای خروجی از پیل سوختی از سه طریق قابل استفاده است. گرمایش محیط، تهیه آب گرم و استفاده از یک چیلر جذبی برای تهیه سرمایش. مطالعه آن‌ها بر اساس استفاده از چیلر جهت تهیه سرمایش بود.

تارک و همکاران^۱ [۴۵] یک سیستم تولید همزمان بر اساس پیل سوختی کربنات مذاب را مورد آنالیز قرار دادند. با توجه به اینکه پردیس مهندسی دانشگاه ایالتی میسوری آمریکا، یکی از تولید کنندگان آلاینده‌های زیست محیطی است، مطالعه آن‌ها در دانشگاه مذکور انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از طرح پیشنهادی می‌توان از توان خروجی برای برق مورد نیاز دانشگاه و از گرمای خروجی سیستم برای گرمایش محلی استفاده کرد. همچنین هیدروژن تولیدی هم برای حمل و نقل محلی استفاده شد. مقداری از سوخت مورد نیاز طرح مذکور از طریق خروجی صنایع و فضولات حیوانات که یک منبع انرژی هستند تامین شد.

معرفتی و همکاران [۴۶] یک سیستم هیبرید تولید همزمان پیل سوختی-کلکتور پارابولیک خورشیدی را با فرایند جذب دی اکسید کربن مورد بررسی قرار دادند. سیستم خورشیدی آن‌ها به عنوان مبادله گر گرما استفاده شد. توربین و پیل سوختی مورد استفاده در سیستم به ترتیب ۶۴۰ و ۸/۳ مگاوات الکتریسیته تولید کردند. آن‌ها فشار، دما و پارامترهای موثر بر تولید انرژی و اثر آن‌ها را بر سیستم مورد آنالیز قرار دادند.

در تحقیقی بر اساس تحلیل ترمودینامیکی، قربانی و همکاران [۴۷] یک سیستم تولید همزمان بر اساس چیلر جذبی، پیل سوختی کربنات مذاب و سیکل شیرین سازی را مورد مطالعه قرار دادند. قدرت خروجی از پیل تامین شد و چیلر جذبی آب آمونیاک جهت تولید برودت در سیستم مذکور استفاده شد. تحلیل انرژی و انرژی سیکل مربوطه توسط آنان نیز ارزیابی گردید و پارامترهای موثر بر راندمان انرژی را تحلیل کردند. نتایج ارزیابی نشان داد که پیل سوختی کربنات مذاب بیشترین نرخ تخریب انرژی را داراست.

^۱ Tarek et al

آناماریا و همکاران^۱ [۴۸] یک پیل سوختی کربنات مذاب به صورت آزمایشگاهی مدل‌سازی کردند. سوخت مورد نیاز کربنات مذاب یک بار با استفاده از گاز لندفیل و یک بار با استفاده از هیدروژن و یک بار هم مخلوطی از این دو تامین شد. با توجه به این که سوخت‌های متفاوتی وارد پیل می‌شوند، یک ریفورمر خارجی و پاک کننده سوخت در این سیستم تجهیز شده است. نتایج نشان داد که پیل سوختی با استفاده از هر دو سوخت به طور صحیح عمل کرد اما پیل سوختی با استفاده از هیدروژن عملکرد بهتری از انرژی از خود نشان داد. اما لندفیل گاز به دلیل هزینه بسیار کم، بیشتر در دسترس می‌باشد.

در پژوهشی دیگر، انصاری‌نصب و مهرپویا [۴۹] سیستم تولید همزمان بر اساس پیل سوختی کربنات مذاب انجام دادند. گرمای خروجی پیل وارد موتور استرلینگ و توربین گاز شد. یک چیلر جذبی دواثره برای تولید برودت در سیستم مذکور تجهیز شد. این سیستم از نظر انرژی و انرژی تجزیه و تحلیل شد. نتایج مطالعه نشان داد که بیشترین بازگشت ناپذیری را پیل سوختی و محفظه احتراق دارد و هزینه گذاری انرژی مورد بررسی قرار گرفت.

آنتولینی^۲ [۵۰] مروری بر کارهای انجام گرفته بر پیل سوختی کربنات مذاب انجام داد. این بررسی با هدف کاهش میزان رسوب پذیری و انحلال اند و کاتدها در جریان‌ات ایجادی جهت تولید الکتریسیته انجام شد. نتایج بر این اساس استوار بود که مقاومت اند با اضافه کردن آلومینیوم یا کروم بهبود پیدامیکند. اما در کاتد یا با افزایش قلیایی محلول و افزایش اکسید نیکل فشار قابلیت انحلال کاتد فقط به فشار دی اکسید کربن بستگی دارد.

ریکاردو و همکاران^۳ [۵۱] با استفاده از بیوگاز، سیستم تولید همزمان برق و حرارت با استفاده از محرک اولیه پیل سوختی کربنات مذاب انجام دادند. هدف اصلی مطالعه آن‌ها کاهش آلاینده‌های زیست محیطی بود.

^۱ Annamaria et al

^۲ Antolini

^۳ Ricardo et al

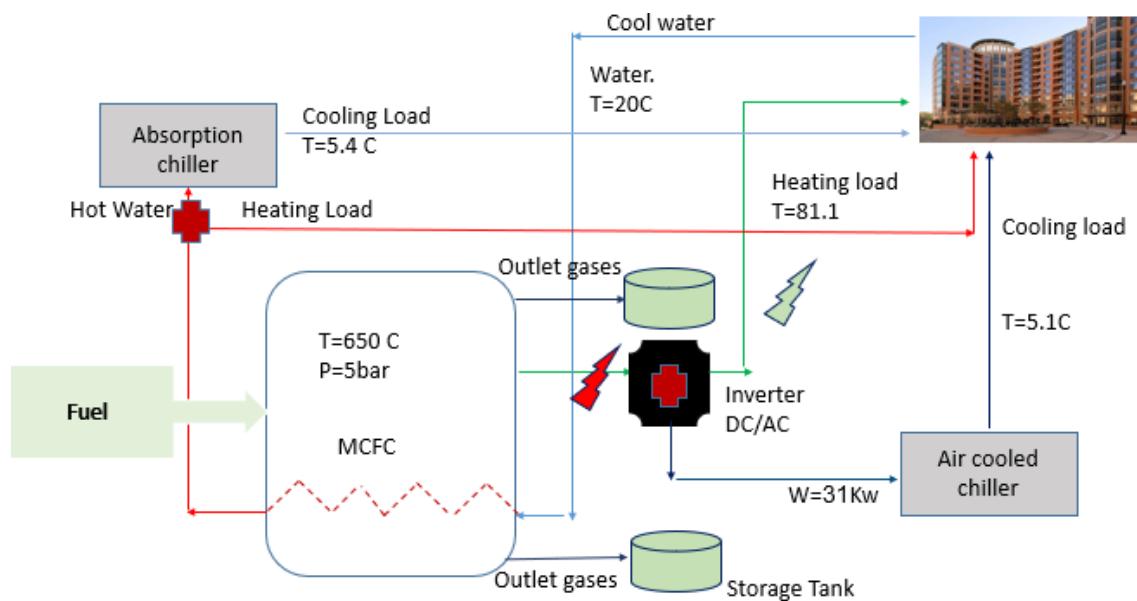
سوخت مورد استفاده از پیل سوختی از طریق گازهای خروجی از فاضلابها تامین شد. آنها با استفاده از روش مونت کارلو^۱، تحلیل اقتصادی سیستم را آنالیز کردند.

۲-۵ معرفی پژوهش حاضر

در تحقیقات انجام شده تا کنون چیلر جذبی و تراکمی با سیستم پیل سوختی کربنات مذاب ترکیب نشده است. در واقع پژوهشها بر اساس چیلر جذبی بوده است. در این پژوهش پیل سوختی کار و حرارت تولید می کند که مقداری از حرارت جهت راه اندازی چیلر جذبی و باقی مانده حرارت که آب گرم جهت تامین گرمایش مورد استفاده قرار می گیرد. مقداری از کار خروجی پیل سوختی جهت راه اندازی چیلر تراکمی مورد استفاده قرار می گیرد. این سیکل از پنج دیدگاه انرژی، انرژی، تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان و اقتصادی بررسی و ارزیابی شده است در حالی عمده پژوهشهای انجام شده در راستای عملکرد سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه پیل سوختی انجام شده است و تا کنون سیکل پیشنهادی و دیدگاههای نامبرده در یک کار ارزیابی نشده است و به تحلیل انرژی و انرژی بسنده شده است و تنها با ارجاع دادن مقدار ضریب عملکرد پژوهش خود را انجام داده اند. در این سیکل ابتدا مدل های انرژی، انرژی و تحلیل ریسک (کل سیستم) برای پیل سوختی کربنات مذاب انجام شده است. سپس تحلیل انرژی و انرژی سیکل چیلر جذبی و چیلر تراکمی بررسی شده است. با داشتن آنالیز اولیه بازده انرژی و انرژی کل سیکل مورد تحلیل قرار گرفته است. این سیکل از دو نظر مورد ارزیابی قرار گرفته است. اول استفاده تنها از چیلر جذبی و دوم استفاده از چیلر جذبی و تراکمی. با اضافه کردن چیلر تراکمی بازده انرژی و انرژی سیستم به مراتب افزایش یافت و در نهایت سیکل پیشنهادی از نظر اقتصادی پارامترهای نرخ تنزیل و تورم، بازگشت سرمایه، ارزش خالص پول، ارزش حال و آینده پول، بازپرداخت ماهانه و سالانه و ارزش اسقاطی اجزا مورد ارزیابی قرار گرفته است. سیکل پیشنهادی تولید همزمان در این پژوهش در شکل (۲-۱)، به وضوح دیده می شود. همان طور که مشاهده می شود پیل سوختی پس از دریافت سوخت، مقداری توان و حرارت آزاد می کند که از این حین مقداری توان وارد چیلر

^۱ Monte Carlo

تراکمی می‌شود. در این جا مقدار برودت مورد نیاز ۲۳۷ کیلووات می‌باشد که ۱۲۵/۸۳۱ توسط چیلر جذبی و مقدار برودت مورد نیاز باقی مانده توسط چیلر تراکمی تامین می‌شود. با توجه به اینکه پیل‌های سوختی پس از تولید توان مقداری حرارت آزاد می‌کنند، این مقدار انرژی را می‌توان بازگردانی کرد و جهت استفاده در گرمایش و چیلر جذبی به کار برد. به همین علت مقداری حرارت پس از بازگردانی حرارت پیل سوختی وارد چیلر جذبی می‌شود که نتیجه این دو نیز برودت خروجی است که جهت استفاده مصرف کننده وارد ساختمان و یا شبکه می‌شود. در این پیل سوختی از یک ریفرمر خارجی جهت تولید هیدروژن استفاده شده است و لازم به ذکر است که تحلیل انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان در این پژوهش از پیل سوختی به بعد انجام شده است.



شکل (۱-۲)، سیکل پیشنهادی پژوهش حاضر

فصل سوم

معادلات حاکم بر سگلی

۳-۱) پیشگفتار

در این فصل مدل سازی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر اساس پیل سوختی کربنات مذاب مورد بررسی و تجزیه قرار گرفته است. در این فصل ابتدا فرضیات مدل سازی بیان شده است و سپس معادلات حاکم بر سیکل برای اجزا نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲) فرضیات

سیستم حالت پایا است

واکنش های شیمیایی به حالت پایا برسند

فشار کاری پیل سوختی ۵ بار است

دمای کاری پیل سوختی ۶۵۰ درجه سانتی گراد است

پیل سوختی جوری طراحی شده است که ۱۰٪ از حرارت اتلاف شده و آب سرد ورودی به پیل بقیه حرارت را جذب می کند

دمای محیط ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است

فشار محیط ۱ بار است

پیل سوختی دما و فشار ثابت فرض شده است

فاکتور مصرف آند ۷۰ و در کاتد ۴۵ درصد در نظر گرفته شده است

۳-۳) مقدمه

پیل های سوختی با توجه به نوع کاربردی که برای آنها مد نظر است، انواع مختلفی دارند. که از جمله آن می توان به پیل های سوختی اکسید جامد، قلیایی، اسید فسفریک، متالونی و پلیمری نام برد. دمای و فشار کارکرد پیل های سوختی متفاوت است ولی پیل سوختی ای که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته، کربنات مذاب است.

۳-۴ پیل سوختی کربنات مذاب

پیل سوختی یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در آند پیل سوختی پلیمری واکنش اکسیداسیون انجام می‌گردد و الکترون تولید شده وارد مدار خارجی شده و سپس به کاتد وارد می‌شود. یون مثبت تولیدی در آند با عبور از غشاء الکتrolیت به قسمت کاتد رفته و با اکسیژن هوا و الکترونی که از مدار خارجی به قسمت کاتد وارد شده است به آب تبدیل می‌گردد.

۳-۴-۱ تحلیل قانون اول برای پیل سوختی کربنات مذاب

واکنش‌های الکتروشیمیایی که در آند، کاتد و کل سیستم رخ میدهد به ترتیب مطابق معادلات (۳-۱) تا (۳-۳) می‌باشند.



توان خروجی از سیستم با توجه به رابطه (۳-۴) حاصل می‌شود.

$$W = N.A.j.V \quad (۳-۴)$$

جهت تبدیل برق متناوت به مستقیم از رابطه (۳-۵) استفاده می‌شود که بازده اینورتر ۰/۹۶۵ در نظر گرفته شده است

$$1MW_{DC} = MW_{DC} \times 0.9645 \quad (۳-۵)$$

در رابطه مذکور، N تعداد پیل‌ها در استک مورد نظر، A سطح فعال پیل، j شدت جریان و v نیز ولتاژ جاری در MCFC میباشد که ولتاژ از رابطه (۳-۶) محاسبه می‌شود.

$$V_{cell} = E_{nerst} - (R_{an} + R_{ca} + R_{ohmic}) \times j \quad (۳-۶)$$

در رابطه (۳-۶)، V_{cell} ، ولتاژ واقعی، E_{nerst} ولتاژ بازگشت پذیر ایده آل می‌باشد. اتلافات مقاومتی پیل که شامل مقاومت اهمیک، کاتد و آند میباشد، به ترتیب با توجه روابط (۳-۷) تا (۳-۹) محاسبه می‌شوند [۵۲].

$$R_{ohmic} = 0.5 \times 10E-4 \times \exp\left(3016 \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{923}\right)\right) \quad (7-3)$$

$$R_{ca} = 7.505 \times 10E-10 \times \exp\left(\frac{E_{ac,ca}}{RT}\right) \times (p^{-0.43}_{O_2,ca}) \times (p^{-0.09}_{CO_2,ca}) \quad (8-3)$$

$$R_{an} = 2.27 \times 10E-9 \times \exp\left(\frac{E_{ac,an}}{RT}\right) \times (p^{-0.42}_{H_2,an}) \times (p^{-0.17}_{CO_2,an}) \times (p^{-1}_{H_2O,an}) \quad (9-3)$$

ولتاژ بازگشت پذیر ایده آل توسط رابطه (۳-۱۰) محاسبه می شود.

$$E_{nerst} = \left(\frac{\Delta G}{n_e \times F}\right) + \left(\frac{RT}{n_e \times F}\right) \times \ln\left(\frac{P_{H_2,an} \times P^{0.5}_{O_2,ca} \times P_{CO_2,ca}}{p^1_{H_2O,an} \times p^1_{CO_2,an}}\right) \quad (10-3)$$

اختلاف انرژی آزاد گیبس در پیل سوختی کربنات مذاب که به دمای واکنش بستگی دارد، توسط رابطه (۱۱)-۳ بدست می آید. در روابط مذکور $p_{i,an,ca}$ فشار جزئی و n_e تعداد الکترون های آزاد شده می باشد.

$$\Delta G = 242000 - 45.8T \quad (11-3)$$

گرمای خروجی از پیل های سوختی توسط رابطه ترمودینامیکی زیر حاصل می شود. با استفاده از روابط (۱۲)-۳

(۳) الی (۱۴-۳) می توان حرارت تولیدی در MCFC را محاسبه کرد [۵۳].

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{ch} - \dot{Q}_{th} - \dot{W}_{el} \quad (12-3) \quad \text{در}$$

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{fuel,consumed} \cdot LHV_{fuel} \quad (13-3)$$

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_o h_o + \dot{Q}_{th} \quad (14-3)$$

رابطه (۱۲-۳) \dot{Q}_{net} نرخ حرارت خالص قابل دست یابی و \dot{W}_{fc} نرخ توان خروجی از پیل سوختی MCFC

می باشد، که توسط رابطه (۴-۳) ارزیابی می گردد. انرژی انتالپی شیمیایی توسط رابطه (۱۵-۳) محاسبه می -

شود.

$$h = c_p \times T \quad (15-3)$$

اگر سوخت دارای ارزش حرارتی باشد، در اینصورت انتالپی آن با استفاده از رابطه (۱۶-۳)، حاصل می شود.

$$h = \dot{m}_i (c_p \times T + h_{HHV}^0) \quad (16-3)$$

ضریب مصرف^۱ سوخت و اکسیدنت در آند و کاتد با استفاده از رابطه (۱۷-۳) محاسبه می شود. این فاکتور

بی بعد بوده و جهت اینکه سیستم چقدر سوخت و اکسیدنت مصرف می کند معرفی می شود. در معادله (۳)-

^۱Utilization Factor

(۱۸) ضریب فاکتور M^1 تعریف شده است. M فاکتور نشان دهنده این است که کم بودنش پتانسیل حرارتی بیشتر و زیاد بودنش پتانسیل الکتریکی بیشتر را توجیه می‌کند.

$$U = \frac{\dot{n}_{in} - \dot{n}_{out}}{\dot{n}_{in}} \quad (۱۷-۳)$$

$$M_{factor} = \frac{W_{mfc}}{Q_{mfc} + W_{mfc}} \quad (۱۸-۳)$$

۳-۴-۲ تحلیل قانون دوم پیل سوختی کربنات مذاب

آنالیز انرژی پیل سوختی اطلاعات مفیدی در اختیار استفاده کنندگان سیستم قرار می‌دهد. در واقع آنالیز و بررسی انرژی پیل سوختی به درک و فهم این مسئله که قدرت خروجی از پیل سوختی کربنات مذاب برحسب اینکه سوخت ورودی به پیل حداکثر چه مقدار می‌توانست تولید اما تولید نکرد کمک می‌کند. برای یک حجم کنترل آنالیز انرژی با کمک رابطه‌ی (۱۹-۳) انجام می‌گیرد.

$$\sum \dot{E}X_{in} - \sum \dot{E}X_{out} + \sum_k \dot{E}X^Q - \sum_k \dot{E}X^W - \sum \dot{E}X_{dest} = 0 \quad (۱۹-۳)$$

در رابطه (۱۹-۳)، $\sum \dot{E}X_{in}$ نرخ انرژی ورودی، $\sum \dot{E}X_{out}$ نرخ انرژی خروجی، $\sum_k \dot{E}X^Q$ انرژی انتقال حرارت و $\sum_k \dot{E}X^W$ انرژی پیل سوختی که توسط کار تبادل می‌شود. همچنین $\sum \dot{E}X_{dest}$ بازگشت ناپذیری یا تخریب انرژی می‌باشد. ترم $\dot{E}X$ با کمک رابطه (۲۰-۳) تعریف می‌شود.

$$\dot{E}X = \dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch} + ex_{kn} + ex_{pt}) \quad (۲۰-۳)$$

در پیل سوختی کربنات مذاب از انرژی پتانسیل و جنبشی که به ترتیب ترم‌های سوم و چهارم معادله (۲۰-۳) صرف نظر می‌شود.

انرژی فیزیکی توسط رابطه (۲۱-۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه h نشان دهنده آنتالپی و S نشان دهنده آنتروپی است. همچنین زیر نویس صفر به معنای شرایط محیطی یا حالت مرده است. رابطه (۲۱-۳) برای یک گاز ایده آل به شکل رابطه (۲۲-۳) ظاهر می‌شود [۵۴].

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (۲۱-۳)$$

$$ex_{ph} = c_p T_0 \left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (22-3)$$

$$ex_{ch} = \sum x_n \times ex_{ch}^n + RT_0 \sum x_n \ln x_n \quad (23-3)$$

اگرژی شیمیایی [۵۵] با استفاده از رابطه (۲۳-۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه x_n کسر جرمی جز n ام است. ex_{ch}^n اگرژی شیمیایی استاندارد جز n ام است. برای محاسبه مقادیر اگرژی که در اثر توان و انتقال حرارت با محیط تبادل می‌گردد از دو معادله‌ی (۲۴-۳) و (۲۵-۳) استفاده می‌شود.

$$\dot{W}_{net} = \sum_k \dot{E}X^w \quad (24-3)$$

$$\sum_k \dot{E}X^Q = \dot{Q}_{net} \times \left(1 - \frac{T_0}{T_{MFC}} \right) \quad (25-3)$$

۳-۴-۳ تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم تولید همزمان

تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم می‌تواند یکی از پرکاربردترین مولفه‌های تحلیل در بخش مهندسی باشد. عملاً بررسی این موضوع مستلزم این است که مهندسین، باید بر علم آمار و احتمالات تسلط داشته باشند. با دانستن تعداد ساعات خرابی یک محصول می‌توان تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان مهندسی شده محصول را انجام داد. با این وجود به دلیل اینکه داهای طول عمر دستگاه‌ها انحصراً در دست شرکت‌های مربوطه است، نمی‌توان آنالیز را بر اساس داده‌های واقعی تحلیل کرد. جهت غلبه بر این مشکل ۵۰ داده فرضی جهت تحلیل قابلیت اطمینان سیستم در نظر گرفته و تحلیل این بخش با استفاده از نرم افزار ایزی‌فیت^۱ و اکسل^۲ انجام شده است. در نظریه احتمالات، قوانین متعددی وجود دارد که رابطه عملی بین متغیر تصادفی X و احتمال آن را با $P(X)$ نشان می‌دهد. هر عملی که مداوم در طبیعت تکرار می‌شود از یک توزیع مشخصی پیروی می‌کند [۵۶]. تابع چگالی توزیع وایبل مطابق رابطه (۲۶-۳) می‌باشد.

$$f(t) = \frac{\beta}{\xi} \times (t/\xi)^{\beta-1} \times \exp[-(t/\xi)^{\beta-1}] \quad (26-3)$$

^۱ Easy fit

^۲ Excel

در رابطه (۲۹-۳) β پارامتر شکل، ξ پارامتر اسکیل و t متغیر مربوطه می‌باشد که در اینجا مقدار t طول عمر سیستم تولید همزمان است. قابلیت اطمینان تحت عنوان "احتمال اینکه سیستم در طی مدت زمان مشخص خراب نشود" تعریف می‌شود و با استفاده از رابطه (۲۷-۳) تعریف می‌شود.

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (۲۷-۳)$$

که $F(t)$ تابع تجمعی توزیع وایبل می‌باشد و با استفاده از رابطه (۲۸-۳) محاسبه می‌شود.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (۲۸-۳)$$

تابع هازارد^۱ تحت عنوان "اثر سن سیستم بر روی قابلیت اطمینان سیستم" تعریف می‌شود. تابع هازارد با استفاده از رابطه (۲۹-۳) قابل محاسبه است [۵۷].

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (۲۹-۳)$$

$E[N(t)]$ تحت عنوان "تعداد خرابی‌های سیستم تا زمان t تعریف می‌شود. باید خاطر نشان کرد که منظور از سیستم، یک سیستم تعمیر پذیر می‌باشد و با توجه به اینکه پیل سوختی یک سیستم تعمیر پذیر در نظر گرفته می‌شود میتوان این پارامتر را برای سیستم ارایه کرد و این پارامتر با استفاده از رابطه (۳۰-۳) قابل محاسبه است [۵۷].

$$E[N(t)] = \int_0^t h(t)dt \quad (۳۰-۳)$$

$MTTF^2$ تحت عنوان "متوسط زمان تا اولین خرابی یک سیستم تعمیر پذیر و متوسط زمان تا خرابی سیستم برای سیستم‌های تعمیرناپذیر" تعریف می‌شود. باید اذعان شود که $MTTF$ هم برای سیستم‌های تعمیرناپذیر و هم برای سیستم‌های تعمیر پذیر تعریف می‌شود. تعریف ریاضی $MTTF$ میتواند به صورت رابطه (۳۱-۳) بیان شود:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (۳۱-۳)$$

^۱ Hazard Function

^۲ Mean Time To Failure

۳-۵ چیلر جذبی

چیلرهای جذبی سیستم‌هایی هستند که دارای ژنراتور و جذب کننده هستند و بر خلاف چیلرهای تراکمی که از انرژی الکتریکی به عنوان انرژی اولیه استفاده می‌کنند، این چیلرها از حرارت به عنوان انرژی اولیه می‌کنند. به دلیل این که محرک اصلی این چیلرها انرژی حرارتی است، حرارت اولیه به ژنراتور داده می‌شود. نمونه‌ای از یک چیلر جذبی در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. این چیلرها راه‌حل خوبی برای استفاده از انرژی‌های حرارتی اتلاف شده می‌باشند.

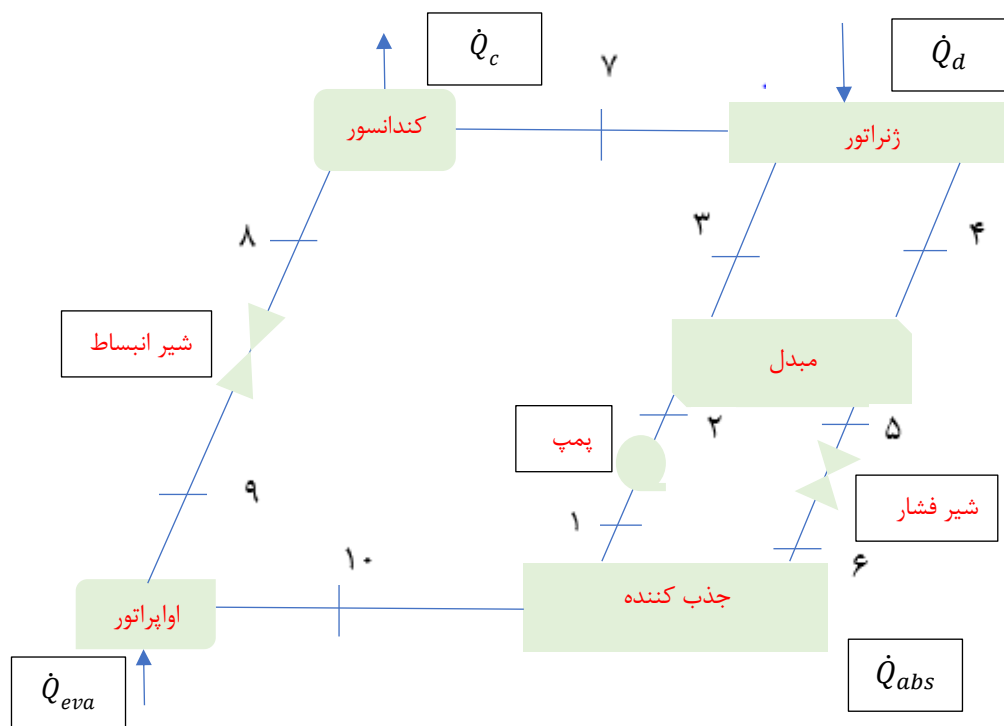


شکل (۳-۱): نمونه عملکرد چیلر جذبی [۵۸]

۳-۵-۱ تحلیل قانون اول چیلر جذبی

همانطور که در شکل (۳-۲) واضح است، در سیستم‌های جذبی از کمپرسور گرمایی (شامل ژنراتور، ابزربر، پمپ و مبدل حرارتی) برای جوشش مبرد در محوطه‌ای از محلول لیتیم بروماید و فشرده‌سازی بخار مبرد در فشار بالا استفاده می‌شود. افزایش فشار مبرد، دمای تراکم را نیز افزایش می‌دهد و این یعنی بخار مبرد در دما و فشار بالاتر به مایع تبدیل می‌شود. از آنجایی که دمای تراکم بیشتر از دمای محیط است، حرارت از کندانسور به محیط منتقل می‌شود. مایع فشار بالا پس از عبور از یک دریچه فشارش تقلیل می‌یابد و با ادامه روند کاهش فشار نقطه جوش پایین می‌آید. سپس این مایع فشار پایین وارد اواپراتور شده و می‌جوشد. از آن جا که دمای

جوش اکنون پایین تر از دمای هوا است، حرارت از هوا به مبرد منتقل شده و مبرد می جوشد و خود هوا خنک می شود. بخار مبرد دوباره وارد ایزربر شده و در آنجا توسط لیتیم بروماید حرارتش گرفته و کندانس می گردد. لیتیم بروماید با جذب حرارت رقیق شده و به ژنراتور پمپ می شود؛ از آنجایی که این محلول نمی جوشد با افزودن حرارت، بخشی از محلول بخار شده و به راحتی از آن جدا شده و لیتیم بروماید خالص مجدد وارد ایزربر می شود و این روند همواره تکرار می گردد.



شکل (۳-۲): نحوه عملکرد چیلر جذبی تک اثره

در چیلر جذبی مورد بررسی مقداری از گرمای خروجی پیل سوختی وارد ژنراتور می شود که محرک اصلی چیلر جذبی است. برای مبدل حرارتی چیلر جذبی روابط (۳-۳۲) تا (۳-۳۵) برقرار است [۵۹].

$$Eff_{Hx} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} \quad (۳-۳۲)$$

$$C_{hot} = m_4 \cdot \left[\frac{h_4 - h_5}{T_4 - T_5} \right] \quad (۳-۳۳)$$

$$C_{cold} = m_2 \cdot \left[\frac{h_3 - h_2}{T_3 - T_2} \right] \quad (۳-۳۴)$$

$$Q_{hx} = m_1 \cdot (h_3 - h_2) = m_4 \cdot (h_4 - h_5) \quad (۳-۳۵)$$

در روابط مذکور، Eff_{Hx} کارایی مبدل حرارتی و Q_{hx} حرارتی است که بین دو جریان جرمی ورودی به ژنراتور و دبی جرمی خروجی از ژنراتور تبادل می‌گردد. معادلات حاکم بر ژنراتور در روابط (۳-۳۶) تا (۳-۳۸) آورده شده است.

$$m_3 = m_4 + m_7 \quad (۳-۳۶)$$

$$m_3 x_3 = m_4 x_4 \quad (۳-۳۷)$$

$$m_3 h_3 - m_4 h_4 - m_7 h_7 + Q_d = 0 \quad (۳-۳۸)$$

در روابط (۳-۳۶) تا (۳-۳۸)، x غلظت و Q_d گرمایی منتقل شده به ژنراتور است. معادلات حاکم بر کندانسور، شیر و اپراتور در روابط (۳-۳۹) تا (۳-۴۲) نشان داده شده‌اند.

$$Q_{con} = m_7(h_7 - h_8) \quad (۳-۳۹)$$

$$Q_{eva} = m_9(h_{10} - h_9) \quad (۳-۴۰)$$

$$m_{10}h_{10} + m_6h_6 - Q_{abs} - m_1h_1 = 0 \quad (۳-۴۱)$$

$$COP = \frac{Q_{eva}}{Q_d} \quad (۳-۴۲)$$

۳-۵-۲ تحلیل قانون دوم چیلر جذبی

اگرژی یک سیال از رابطه (۳-۴۳) محاسبه می‌شود [۶۰].

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (۳-۴۳)$$

در رابطه (۳-۴۴)، ψ اگرژی جریان، h ، T_0 و s به ترتیب نشان دهنده‌ی آنتالپی دمای محیط و آنتروپی می‌باشد. تخریب اگرژی برای هریک از اجزای چیلر جذبی را می‌توان به شکل معادله (۳-۴۷)، درآورد.

$$X_{dest} = \sum (m\psi)_i - \sum (m\psi)_e + \sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_i - \sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_e - \sum W \quad (۳-۴۴)$$

بازده قانون دوم چیلر جذبی با استفاده از رابطه (۳-۴۵) محاسبه می‌شود.

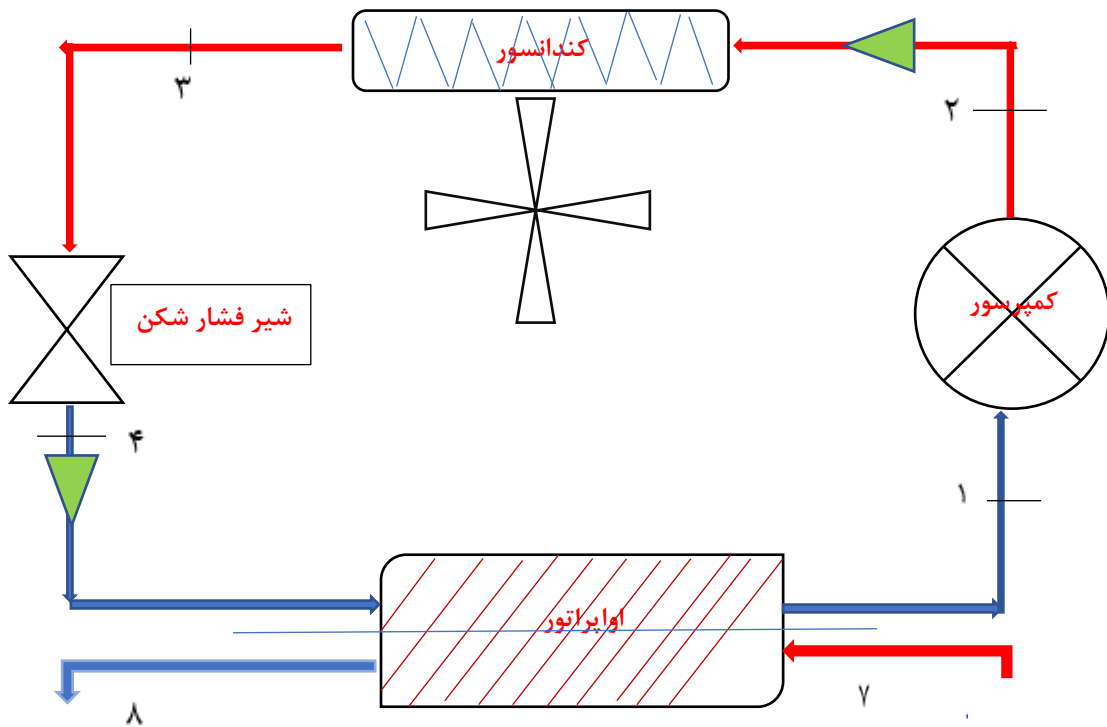
$$\eta_{ex} = \frac{Q_{eva} - X_{dest}}{Q_d} \quad (۳-۴۵)$$

۳-۶ چیلر تراکمی

چیلرها به دو دسته چیلرهای تراکمی و چیلرهای جذبی تقسیم می‌شوند. شکل دیگر تقسیم‌بندی چیلرها بر اساس شکل خنک شدن ماده مبرد است که به سه دسته آب خنک، هوا خنک و تبخیری تقسیم بندی می‌شوند. چیلرهای تراکمی با استفاده از انرژی الکتریکی و چیلرهای جذبی با استفاده از انرژی حرارتی باعث ایجاد برودت و سرما می‌شوند. در چیلرهای تراکمی گاز ابتدا توسط کمپرسور، متراکم می‌گردد. این گاز سپس به کندانسور وارد شده توسط آب یا هوای محیط، خنک شده و به مایع تبدیل می‌گردد این مایع با عبور از شیر انبساط یا لوله موئین وارد خنک‌کننده (اوپراتور) می‌شود که در فشار کمتری قرار دارد. این کاهش فشار باعث تبخیر مایع گردیده و در نتیجه مایع سردکننده با گرفتن حرارت نهان تبخیر خود از محیط خنک‌کننده، باعث ایجاد برودت در موادی که با قسمت خنک‌کننده در ارتباط اند می‌گردد. سپس گاز ناشی از تبخیر، به کمپرسور منتقل می‌شود. با عبور بخار با سرعت در یک مسیر هوای کندانسور مکیده می‌شود. خلاء در کندانسور به علت تبدیل بخار به اب و اختلاف حجم بین بخار و اب ایجاد می‌گردد [۶۱].

۳-۶-۱ تحلیل قانون اول برای چیلر تراکمی هوا خنک

در این چیلر تراکمی از جاذب آب و از مبرد R410A استفاده شده است. چیلر تراکمی هوا خنک مورد مطالعه در شکل (۳-۳) نشان داده است.



شکل (۳-۳)، شماتیک چیلر تراکمی مورد مطالعه

برای سیکل چیلر تراکمی رابطه (۳-۴۶) بر قرار است. با توجه به قانون اول ترمودینامیک برای کمپرسور می توان رابطه (۳-۴۷) را نوشت. در این رابطه h و \dot{w}_{comp} به ترتیب نمایانگر آنتالپی نقاط و توان ورودی به کمپرسور هستند.

$$\sum_i \dot{m} = \sum_o \dot{m} \quad (۳-۴۶)$$

$$\dot{w}_{comp} + \dot{m}h_1 = \dot{m}h_2 \quad (۳-۴۷)$$

معادلات حاکم بر کندانسور، شیر فشار شکن و اوپراتور به ترتیب در معادلات (۳-۴۸) الی (۳-۵۱) نشان داده شده اند. همچنین نسبت فشار نقطه ۲ به ۱ با استفاده از رابطه (۳-۵۱)، ارزیابی می شود.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}h_2 - \dot{m}h_3 \quad (۳-۴۸)$$

$$\dot{m}h_4 = \dot{m}h_3 \quad (۳-۴۹)$$

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}h_1 - \dot{m}h_4 \quad (۳-۵۰)$$

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} \quad (51-3)$$

با استفاده از معادله (52-3) می‌توان ضریب عملکرد چیلر تراکمی مورد مطالعه را محاسبه کرد.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{eva}}{\dot{W}_{comp}} \quad (52-3)$$

3-6-2 تحلیل قانون دوم برای چیلر تراکمی هوا خنک

برای هر یک از اجزای سیکل مورد مطالعه رابطه قانون دوم و یا رابطه‌ی تحلیل انرژی (53-3) برقرار است.

$$X_{dest} = \sum (m\psi)_i - \sum (m\psi)_e + \sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_i - \sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_e - \sum W \quad (53-3)$$

جهت محاسبه بازده قانون دوم چیلر تراکمی از معادله (54-3) استفاده می‌شود [62].

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}_7(ex_7 - ex_8)}{\dot{W}_{comp}} \quad (54-3)$$

در رابطه بازده قانون دوم چیلر تراکمی ex_7 و ex_8 به ترتیب نرخ انرژی ورودی و خروجی آب به اواپراتور می‌باشد.

3-7 راندمان انرژی

معادلات حاکم بر سیکل جهت محاسبه بازده انرژی در روابط (55-3) الی (57-3) به‌وضوح دیده می‌شوند [63 و 47].

$$\eta_{elec} = \frac{\dot{W}_{MCFC}}{\dot{m}_{fuel,in} \cdot LHV} \quad (55-3)$$

$$\eta_{CHP} = \frac{\dot{W}_{MCFC} + \dot{Q}_{net}}{\dot{m}_{fuel,in} \cdot LHV} \quad (56-3)$$

$$\eta_{CCHP} = \frac{\dot{W}_{MCFC} + \dot{Q}_{net} + \dot{W}_{net}}{\dot{m}_{fuel,in} \cdot LHV} \quad (57-3)$$

در روابط (55-3) تا (57-3) LHV نشان‌دهنده ارزش حرارت پایین سوخت، \dot{W}_{MCFC} توان تولید شده توسط

پیل سوختی، η_{elec} راندمان الکتریکی پیل سوختی، $m_{fuel,in}$ دبی جرمی سوخت ورودی به سیکل، Q_{MCFC}

حرارت گرفته شده جهت تامین آب گرم مصرفی توسط پیل سوختی، Q_{net} و W_{net} هم به ترتیب برآیند توان و

گرمای کل سیکل می‌باشد که اگر این انرژی‌ها مصرفی باشند با علامت منفی و اگر تولید کننده باشند با علامت مثبت در نظر گرفته می‌شوند. Q_{net} و W_{net} نیز نشان دهنده توان و گرمای پمپ و کمپرسور چیلر جذبی و تراکمی، گرمای ژنراتور، گرمای کندانسور در چیلر جذبی و تراکمی، گرمای افسوربر در چیلر جذبی و تراکمی و گرمای اواپراتور در چیلر جذبی و تراکمی هستند.

۳-۸ راندمان انرژی

راندمان انرژی پیل سوختی در حالتی که فقط توان تولید کند، توسط رابطه (۳-۵۸) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{elec} = \frac{\dot{W}_{MCFC}}{(ex_{ph} + ex_{ch})_{fuel,in} \cdot \dot{m}_{fuel,in}} \quad (۳-۵۸)$$

همچنین راندمان انرژی برای حالت‌های تولید برق و حرارت یا برق و حرارت و سرما توسط معادلات زیر محاسبه می‌شوند [۴۱].

$$\eta_{exCHP} = \frac{\dot{W}_{MCFC} + \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \cdot \dot{Q}_{MCFC}}{(ex_{ph} + ex_{ch})_{fuel,in} \cdot \dot{m}_{fuel,in}} \quad (۳-۵۹)$$

$$\eta_{exCCHP} = \frac{\dot{W}_{MCFC} + \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \cdot \dot{Q}_{net,sys}}{(ex_{ph} + ex_{ch})_{fuel,in} \cdot \dot{m}_{fuel,in}} \quad (۳-۶۰)$$

۳-۹ بررسی اقتصادی سیستم

۳-۹-۱ متد نرخ‌های بهره

در جهت تامین مالی پروژه‌ها، اغلب سازمان‌ها از بانک‌ها و دیگر سازمان‌های اعتباری پول قرض می‌گیرند. پروژه‌هایی که بدین طریق تامین مالی می‌شوند، به سبب این که نرخ‌های بهره برای وام دریافتی باید پرداخته شود نسبت به پروژه‌هایی که از نقدینگی خود سازمان تامین مالی می‌شوند، هزینه بیشتری دارد. بنابراین اهمیت دارد که این نرخ‌ها در بررسی مورد ارزیابی قرار گیرند. نرخ‌های بهره توسط بانک‌ها و یا سازمان‌های اعتباری به دو طریق قابل محاسبه است.

الف) بهره ساده: اگر بهره ثابت در نظر گرفته شود، آنگاه نرخ‌ها به‌عنوان درصد ثابتی از سرمایه قرض گرفته شده محاسبه می‌شود و باز پرداخت آن با استفاده از معادله (۶۱-۳) محاسبه می‌شود.

$$TRV = LV \times \left(\frac{IR}{100} \times LV \times p \right) \quad (61-3)$$

که در آن TRV کل ارزش بازپرداختی، LV ارزش وام اولیه، IR نرخ بهره و p زمان بازپرداخت است که توسط طرفین قرار تعیین می‌گردد.

ب) بهره مرکب: بهره مرکب به‌طور سالانه محاسبه می‌شود. مبلغ بهره به‌عنوان درصدی از وام در انتهای هر سال محاسبه می‌شود. از آنجایی که وام معوقه حاصل جمع مبالغ نپرداخته تا آن مقطع زمانی است، مرکب نامیده می‌شود. ارزش کل بازپرداخت را می‌توان با استفاده از رابطه (۶۲-۳) محاسبه کرد.

$$TRV = LV \times \left(1 + \frac{IR}{100} \right)^p \quad (62-3)$$

۳-۹-۲ متد بازگشت سرمایه

معروف‌ترین تکنیکی که جهت تحلیل اقتصادی یک سیستم و طرح مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، متد بازگشت سرمایه سرمایه است. دوره بازگشت نسبت کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه یا قیمت کل تجهیزات بکار رفته در سیستم تولید همزمان، به نرخ خالص هزینه‌های سالانه صرفه‌جویی در مصرف انرژی اولیه برای سیستم تولید همزمان می‌باشد. این مدت زمان با کمک رابطه (۶۳-۳) محاسبه می‌شود.

$$PB = \frac{CC}{AS} \quad (63-3)$$

که در آن PB بازگشت سرمایه، CC هزینه سرمایه‌ای اولیه و AS صرفه‌جویی خالص سالانه است.

۳-۹-۳ متد ارزش حال و ارزش کل سرمایه‌گذاری در پایان عمر پروژه

ارزش حال پول در هر زمان مشخص در آینده با استفاده از معادله (۶۴-۳) محاسبه می‌شود. همچنین حاصل جمع کل این مبالغ از ابتدای سال اول تا انتهای عمر پروژه تحت عنوان "ارزش حال خالص" تعریف می‌گردد و با استفاده از رابطه (۶۵-۳) محاسبه می‌شود.

$$PV = S \times \left(1 + \frac{IR}{100}\right)^{-n} \quad (۶۴-۳)$$

$$NPV = \sum_{i=0}^n PV \quad (۶۵-۳)$$

که در آن PV ارزش حال پول، S پول سرمایه‌گذاری و NPV حاصل جمع ارزش‌های پول سرمایه‌گذاری در n سال زمانی است.

۴-۹-۳ متد فاکتور تنزیل

فاکتور تنزیل بر اساس یک نرخ تنزیل است و با استفاده از رابطه (۶۶-۳) محاسبه می‌شود.

$$DF = \left(1 + \frac{IR}{100}\right)^{-n} \quad (۶۶-۳)$$

که در آن، DF فاکتور تنزیل می‌باشد. محصول یک جریان نقدینگی خاص و فاکتور تنزیل، ارزش حال می‌باشد. و با استفاده از رابطه (۶۷-۳) محاسبه می‌شود.

$$PV = S \times DF \quad (۶۷-۳)$$

۵-۹-۳ متد فاکتور تورم

تورم را می‌توان به‌عنوان نرخ افزایش در متوسط قیمت کالاها و خدمات تعریف کرد. زمانی که اثر تورم بر یک پروژه ارزیابی می‌شود، مانند فاکتور تنزیل، استفاده از فاکتور تورم نیز عملی منطقی است و با استفاده از رابطه

(۳-۶۸) ارزیابی می‌شود. در این رابطه IF نرخ بهره می‌شود. محصول یک جریان نقدینگی خاص و فاکتور تورم، ارزش واقعی جریان نقدینگی است.

$$IF = \left(1 + \frac{IR}{100}\right)^n \quad (۶۸-۳)$$

$$RV = S \times IF \quad (۶۹-۳)$$

در رابطه (۳-۶۹)، RV ارزش پول پس از ارزیابی نرخ بهره است.

۳-۹-۶ متد ارزش پول خالص

این متد پس از ارزیابی نرخ تورم و نرخ تورم محاسبه می‌شود. بر این اساس با توجه به معادله (۳-۷۰)، جهت محاسبه ارزش خالص نرخ تورم از نرخ تنزیل کسر می‌گردد.

$$NV = DF - IF \quad (۷۰-۳)$$

که در آن NV ارزش خالص فاکتور تنزیل پول پس از ارزیابی هر دو نرخ مذکور است.

۳-۹-۷ متد ارزش کل سیستم پس از پایان عمر

اجزای مورد استفاده در سیستم تولید همزمان پس از پایان عمر خود تحت عنوان کالاهای اسقاطی به فروش می‌رسند. بر این اساس سیستم پس از پایان عمر خود به تحت ضربی از مقدار سرمایه‌گذاری اولیه به فروش می‌رسد.

فصل چهارم

بحث و نتایج

۴-۱) مقدمه

در فصل سوم مدل سازی سیکل جهت تعیین پارامترهای مورد ارزیابی پیل سوختی، چیلر جذبی و چیلر تراکمی مورد بحث قرار گرفت. مدل ارایه شده قابلیت تعیین میزان حرارت و توان تولیدی توسط پیل سوختی کربنات مذاب و همچنین برودت تولیدی توسط چیلر جذبی و چیلر تراکمی را داراست. بنابراین، در سیکل پیشنهادی با استفاده از نرم افزار حل معادلات مهندسی^۱ تحلیل انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان انجام شده است و با استفاده از نرم افزار ایزی فیت^۲ تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان محرک اولیه انجام شده است. همچنین با استفاده از نرم افزار اکسل تحلیل اقتصادی سیستم نیز بررسی و ارزیابی شده است.

۴-۲) آرایش سیکل

با انتخاب محرک اولیه برای سیستم های تولید همزمان می توان آرایش های مختلفی برای سیستم ارایه داد. در این پژوهش محرک اولیه مورد استفاده پیل سوختی کربنات مذاب انتخاب شده است. محرک اولیه با دریافت سوخت کار و حرارت را نیز آزاد می کند. جهت استفاده از انرژی اتلافی این محرک اولیه از چیلر جذبی تک اثره و چیلر تراکمی نیز استفاده شده است. مقدار گرمای مورد استفاده در استفاده از چیلر جذبی با استفاده از عبور آب سرد در خلال پیل سوختی کربنات مذاب تهیه می شود. این آب ورودی به پیل سوختی هم برای تامین آب گرم و گرمایش استفاده می شود و هم برای خنک کاری سیستم. اگر خنک کاری سیستم به طور مداوم صورت نگیرد به مرور زمان گرمای محرک اولیه بیشتر شده و خسارات مالی برای سیستم به همراه خواهد داشت.

^۱ EES

^۲ EasyFit

۳-۴ پارامترهای ورودی به اجزا سیستم

۱-۳-۴ پیل سوختی

همان‌طور که گفته شد، سوخت مورد نیاز پیل سوختی در این پژوهش توسط یک ریفرمور خارجی تامین می‌شود که تحلیل ترمودینامیکی آن پس از دریافت سوخت از ریفرمور انجام شده است. این پیل سوختی را همانند یک محفظه می‌توان در نظر گرفت که از تعدادی سلول، یک قسمت آند و یک قسمت کاتد تشکیل شده است. جهت ارزیابی سیستم، برای هر جزء باید مقادیری ورودی بر اساس نوع کارکرد و در بازه‌ای منطقی در نظر گرفته شود. بر این اساس در جدول (۱-۴) مقادیر ورودی به پیل سوختی ارائه شده است.

جدول (۱-۴)، پارامترهای ورودی به پیل سوختی

نماد	واحد	مقدار	پارامتر
j	$\frac{mA}{cm^2}$	60.1	جریان
N	-	86517	تعداد سل‌ها [۴۲]
U_{an}	%	70	فاکتور مصرف سوخت
U_{ca}	%	45	فاکتور مصرف اکسیدنت
T_{MCFC}	°C	650	دمای کاری پیل سوختی [۴۵]
P	bar	5	فشار کاری پیل سوختی [۴۸]
E_{act_ca}	$\frac{Kj}{mol}$	77229	انرژی فعال‌سازی کاتد [۴۶]
E_{act_an}	$\frac{Kj}{mol}$	53500	انرژی فعال‌سازی آند [۴۵]
A	m^2	0.697	سطح فعال انجام واکنش [۴۲]
F	$\frac{C}{mol}$	96487	ثابت فارادی [۶۴]
n_e	-	2	تعداد الکترون‌های واکنش دهنده [۴۲]
R	$\frac{J}{mol.K}$	8.314	ثابت گازها

۴-۳-۲ چیلر جذبی

۴-۳-۱-۲ اعتبار سنجی چیلر جذبی:

در جدول (۴-۲)، مقادیر ورودی جهت اعتبار سنجی چیلر جذبی به وضوح دیده می‌شود. با توجه به جدول (۴-۳)، مدل صورت گرفته از دقت قابل قبولی برخوردار است. لازم به ذکر است که مرجع مربوطه [۶۵] که در جدول (۴-۳) مشاهده می‌شود، با استفاده از نرم افزار اسپن مدل سازی را انجام داده است.

جدول (۴-۲)، مقادیر ورودی جهت اعتبار سنجی چیلر جذبی [۶۵]

واحد	مقدار	نوع پارامتر
Kpa	7.445	فشار بالای سیکل
Kpa	0.637	فشار پایین سیکل
%	62.5	غلظت نقطه ۱ سیکل
Kw	14.952	گرمای ورودی به ژنراتور
Kg/s	1	دبی جرمی ورودی به پمپ

جدول (۴-۳)، نتایج حاصل از اعتبار سنجی چیلر جذبی تک اثره

درصد خطا	واحد	مقدار پژوهش مرجع [۶۵] (ASPEN)	مقدار پژوهش حاضر (EES)	نوع پارامتر
5.2	Kw	13.923	13.199	گرمای ابزوربر
1.1	Kw	11.423	11.556	گرمای کندانسور
0.8	Kw	10.772	10.685	برودت اواپراتور
3.4	-	0.738	0.763	ضریب عملکرد
5	°C	1.30	1.38	دمای اواپراتور
5	°C	1.3	1.38	دمای شیر به سمت ابسوربر
6.5	°C	32.70	30.57	دمای پمپ

۴-۳-۲-۲ مقادیر ورودی به چیلر جذبی

گاز مبرد چیلر جذبی مورد مطالعه، R134a می‌باشد. مقادیر ورودی جهت مدل‌سازی چیلر جذبی تک اثره مورد مطالعه مطابق جدول (۴-۴) می‌باشد. چیلر جذبی با مخفف abs نشان داده شده است.

جدول (۴-۴)، پارامترهای ورودی به چیلر جذبی تک اثره

پارامتر	مقدار	واحد	نماد
گرمای ورودی به ژنراتور	125.831	Kw	\dot{Q}_d
دبی آب	0.4	$\frac{Kg}{s}$	\dot{m}_1
دمای نقطه ۴ سیکل (ژنراتور) [۳۰]	72	$^{\circ}C$	T_4
فشار بالا سیکل [۲۹]	5	Kpa	P_h
فشار پایین سیکل [۲۹]	0.9	Kpa	P_l
بازده مبادله گر گرما	88	%	η_{HX}

۴-۳-۳ چیلر تراکمی

۴-۳-۳-۱ اعتبار سنجی چیلر تراکمی

در جدول (۴-۵)، اعتبار سنجی چیلر تراکمی نیز بررسی شده است. با توجه به جدول (۴-۶)، اعتبار سنجی چیلر تراکمی از دقت محاسبات قابل قبولی پیروی می‌کند.

جدول (۴-۵)، مقادیر ورودی به چیلر تراکمی هوا خنک [۶۶]

پارامتر	مقدار	واحد
دمای نقطه ۷	12	$^{\circ}C$
توان ورودی به کمپرسور	41.95	kw
بازده ایزنتروپیک کمپرسور	75	%
دبی جرمی ورودی	1	Kg/s

جدول (۴-۶)، مقادیر خروجی اعتبارسنجی چیلر تراکمی

نوع پارامتر	مقدار پژوهش حاضر (EES)	مقدار پژوهش مرجع [۶۶]	واحد	درصد خطا
برودت خروجی	130.045	140.4	kw	7.3
ضریب عملکرد	3.1	3.347	kw	7.3
گرمای کندانسور	183.11	175.6	kw	4.2
دمای کندانسور	15.88	15	°C	5.6
دمای اواپراتور	5.36	5	°C	6.8

۴-۳-۳-۲ مقادیر ورودی به چیلر تراکمی

چیلرهای تراکمی پس از دریافت کار توسط کمپرسور، سیکل شروع به گردش می‌کند و با توجه به شرایط موجود سیکل برودت توسط اواپراتور ارزیابی می‌گردد. مقادیر ورودی به چیلر تراکمی در جدول (۴-۷) نیز ارائه شده‌اند.

جدول (۴-۷)، پارامترهای ورودی به چیلر تراکمی هواخنک

پارامتر	مقدار	واحد	نماد
کار کمپرسور	31	Kw	\dot{W}_{comp}
دمای اواپراتور	5.1	°C	T_{eva}
دمای کندانسور	44.88	°C	T_{cond}
بازده آیزنتروپیک کمپرسور	70	%	$\eta_{s,comp}$
دبی جرمی سیال	0.2	$\frac{Kg}{s}$	\dot{m}_{AC}

۴-۴ پارامترهای خروجی از سیستم

۴-۴-۱ پیل سوختی

نتایج خروجی از پیل سوختی کربنات مذاب مطابق جدول (۴-۸) می‌باشد.

جدول (۴-۸)، نتایج خروجی از پیل سوختی کربنات مذاب

نماد	واحد	مقدار	پارامتر
V	v	0.8606	ولتاژ
\dot{W}_{MCFC}	Kw	3055	توان خروجی
$\dot{Q}_{MCFC,net}$	Kw	2454	گرمای خروجی
$\dot{E}X_{des,MCFC}$	Kw	3112	تخریب انرژی
$\eta_{ex,MCFC}$	%	59.71	بازده انرژی
η_{MCFC}	%	59.77	بازده انرژی

۴-۴-۲ نتایج خروجی چیلر جذبی

در جدول (۴-۹)، نتایج خروجی چیلر جذبی مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول (۴-۹)، پارامترهای خروجی چیلر جذبی تک اثره لیتیموم برماید

نماد	واحد	مقدار	پارامتر
$\dot{Q}_{eva,abs}$	Kw	105.737	برودت اواپراتور
$\dot{Q}_{cond,abs}$	Kw	110.191	گرمای کندانسور
$\dot{Q}_{HX,abs}$	Kw	26.90	گرمای مبادله گر
η_{abs}	%	84	ضریب عملکرد
$\eta_{ex,abs}$	%	81.4	بازده انرژی
$\dot{E}X_{des,abs}$	Kw	3.256	تخریب انرژی
$\dot{W}_{pump,abs}$	Kw	0.001069	کار پمپ
T_{10}	°C	5.444	دمای نقطه ۱۰
T_1	°C	28.52	دمای نقطه ۱
h_{10}	$\frac{j}{g}$	2511	آنالتپی نقطه ۱۰
h_1	$\frac{j}{g}$	60.31	آنالتپی نقطه ۱
\dot{m}_{10}	$\frac{Kg}{s}$	0.04456	دبی جرمی نقطه ۱۰
\dot{m}_1	$\frac{Kg}{s}$	0.3554	دبی جرمی نقطه ۵
x_1	%	51.78	کیفیت نقطه ۱
x_{10}	%	0	کیفیت نقطه ۱۰

۴-۳-۳ نتایج خروجی چیلر تراکمی

در این چیلر تراکمی از مبرد $R410A$ نیز استفاده شده است. پارامترهای مورد بررسی خروجی این چیلر در جدول (۴-۱۰)، نشان داده شده است.

جدول (۴-۱۰)، نتایج چیلر تراکمی هوا خنک

پارامتر	مقدار	واحد	نماد
برودت اوپراتور	111.9	Kw	$\dot{Q}_{eva,VCRC}$
گرمای کندانسور	142.5	Kw	$\dot{Q}_{cond,VCRC}$
ضریب عملکرد	3.611	-	COP
بازده انرژی	39.47	%	η_{exVCRC}
تخریب انرژی	383.5	Kw	$\dot{E}X_{des,VCRC}$
کار پمپ	31	Kw	$\dot{W}_{pump,VCRC}$
بازده انرژی کمپرسور	70	%	$\eta_{s,VCRC}$
دبی جرمی سیکل	5.16	$\frac{Kg}{s}$	\dot{m}_{VCRC}
فشار نقطه ۱	998.7	Kpa	$P_{1,VCRC}$
دمای نقطه ۱	27.23	$^{\circ}C$	$T_{1,VCRC}$

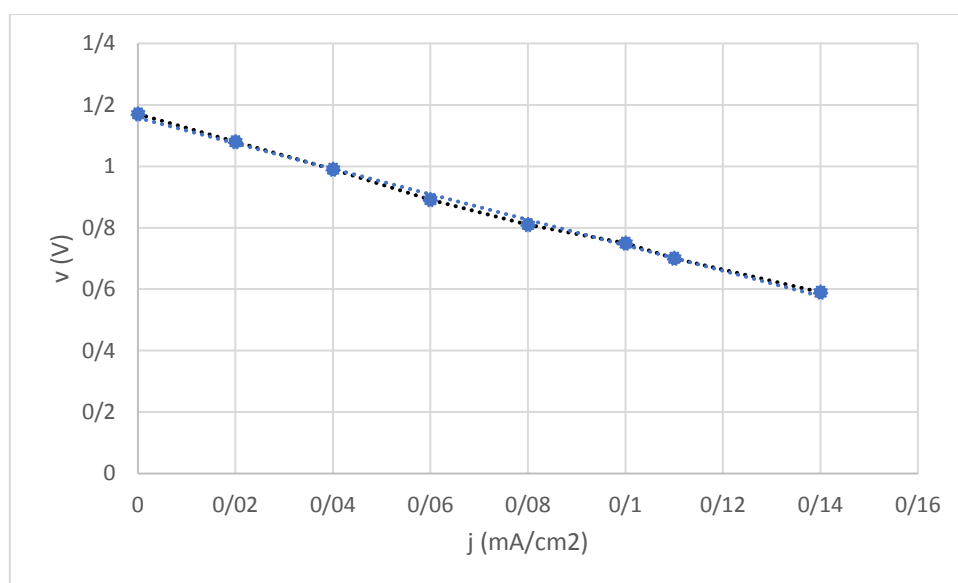
آنتروپی و آنتالپی نقاط سیکل چیلر تراکمی جهت مقایسه این سیکل با دیگر سیکل‌ها در جدول (۴-۱۱)، آورده شده است.

جدول (۴-۱۱)، آنتروپی نقاط مختلف سیکل چیلر تراکمی

نقطه	آنتروپی	آنتالپی
	$\frac{Kj}{kg.K}$	$\frac{Kj}{kg}$
1	1.852	435.5
2	1.894	486.4
3	1.175	252
4	1.189	252
2s	-	471.1

۴-۵ تحلیل انرژی و انرژی

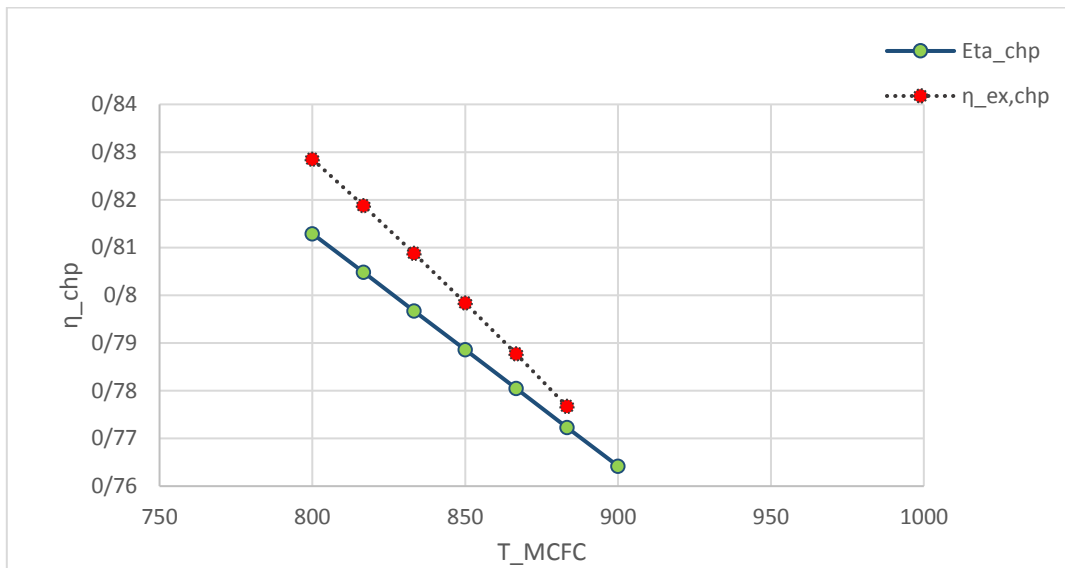
با تغییر مقدار جریان ورودی به سیستم مقدرا ولتاژ و در نهایت توان خروجی از پیل سوختی نیز تغییر می کند. بر این اساس در نمودار (۴-۱)، بررسی تغییر مقدار جریان و ولتاژ پیل سوختی پرداخته شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش مقدار جریان، ولتاژ خروجی از پیل سوختی نیز کاهش پیدا می کند.



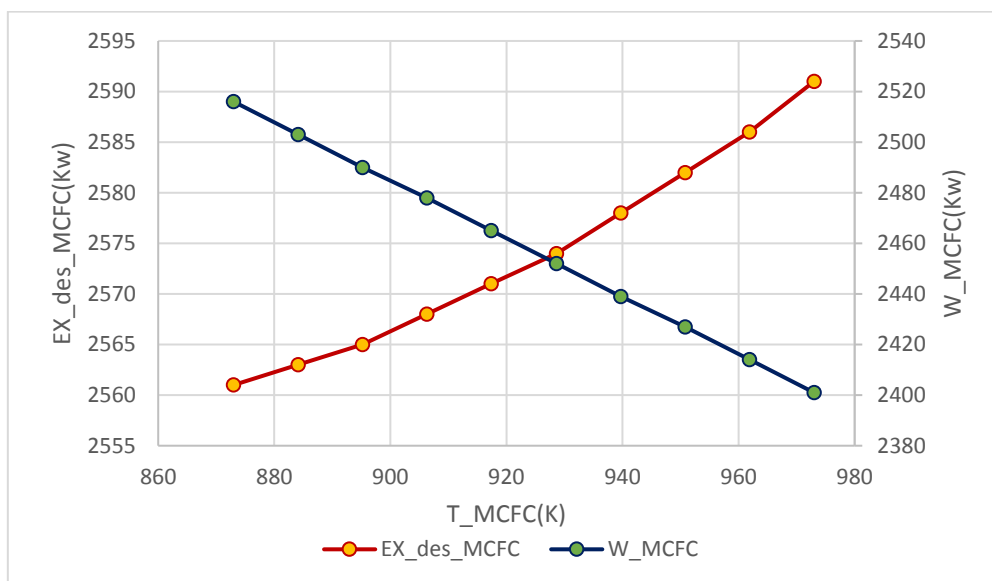
شکل (۴-۱)، تغییرات ولتاژ بر حسب تغییرات جریان پیل سوختی

با افزایش مقدار جریان ورودی، پارامتر ولتاژ نرست پیل سوختی کاهش یافته و به همین علت ولتاژ اصلی پیل سوختی نیز کاهش پیدا می کند.

حال با توجه به اینکه سیکل مدل سازی شده، می توان نتایج کلی سیکل را ارزیابی کرد. در شکل (۴-۲)، نمودار تغییرات دمای کاری پیل سوختی کربنات مذاب بر حسب بازده سیستم در حالت CHP و بازده انرژی سیستم CHP نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود تغییرات بازده انرژی نسبت به تغییرات بازده سیستم در حالت CHP کمتر است اما هردو نرخ کاهش را دنبال می کنند. با افزایش دما، بازده تابع گیبس سیکل کاهش یافته با کاهش مقدار تابع گیبس، ولتاژ نرست کاهش یافته و در نتیجه توان خروجی کاهش و بازده انرژی و انرژی نیز کاهش پیدا می کنند.



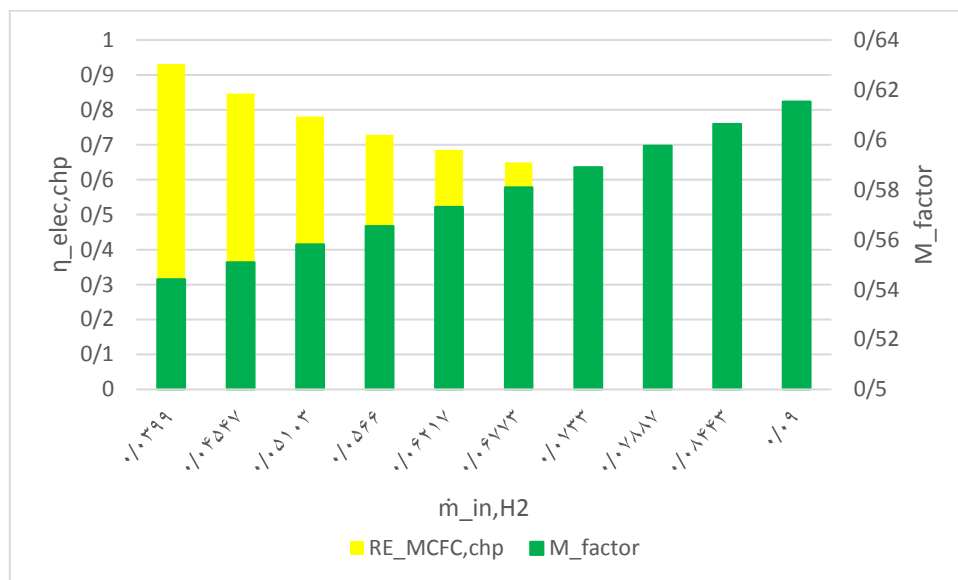
شکل (۴-۲)، تغییرات بازده اگزرژی و انرژی CHP بر حسب دما پیل سوختی



شکل (۴-۳)، تغییرات توان تولیدی و تخریب اگزرژی پیل سوختی براساس تغییرات دما

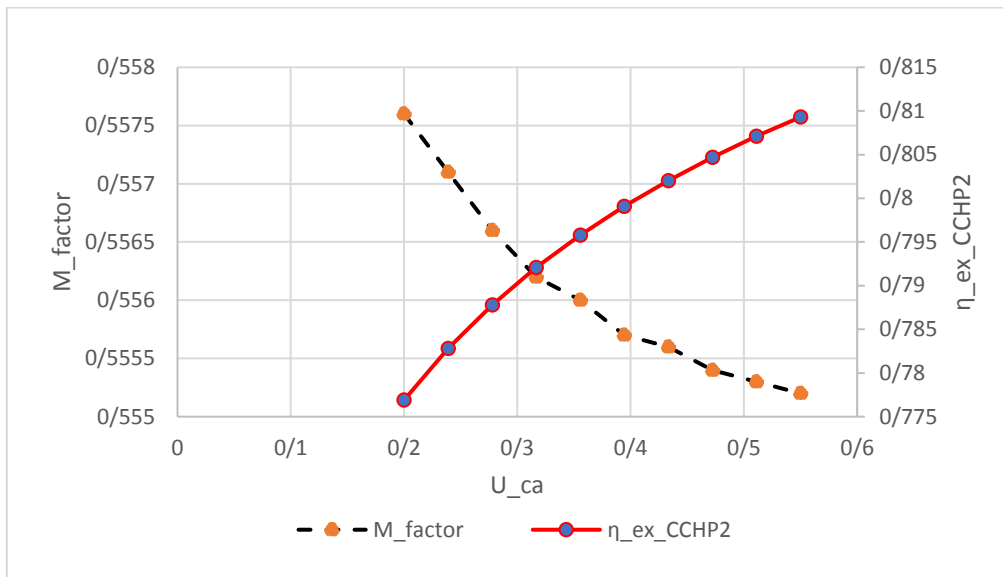
نمودار تخریب اگزرژی و مقدار توان تولیدی توسط پیل سوختی در شکل (۴-۳)، مشاهده می شود. با توجه به رفتار پیل سوختی با افزایش دمای کاری پیل، نرخ تخریب اگزرژی افزایش و مقدار کار تولیدی نیز کاهش میابد. همانطور که مشاهده می شود، در بازه دمایی ۸۶۰ الی ۹۸۰ کلوین، نرخ تخریب اگزرژی به علت افزایش دما پیل سیری صعودی داشته است. با افزایش دمای کار پیل سوختی مقدار حرارت تولیدی در پیل بیشتر شده که می تواند یکی از دلایل افزایش نرخ تخریب اگزرژی باشد. در شکل (۴-۴)، تغییرات بازده اگزرژی سیستم در

حالت استفاده از برق و حرارت و فاکتور M در مقابل مقدار سوخت ورودی هیدروژن مورد بررسی و تجزیه قرار گرفته است. با مشاهده شکل (۴-۴)، نتیجه گرفته می‌شود که به افزایش مقدار سوخت هیدروژن ورودی به سیستم تولید همزمان، بازده انرژی سیستم به مراتب کاهش و مقدار فاکتور M به مراتب افزایش یافت. فاکتور M معیاری جهت ارزیابی مقدار انرژی تولید معرفی شده است. این فاکتور نشان دهنده این است که هرچه مقدار کار تولیدی بیشتر باشد این فاکتور نیز بیشتر می‌شود و با افزایش گرمای تولیدی توسط پیل سوختی این فاکتور کاهش پیدا می‌کند.



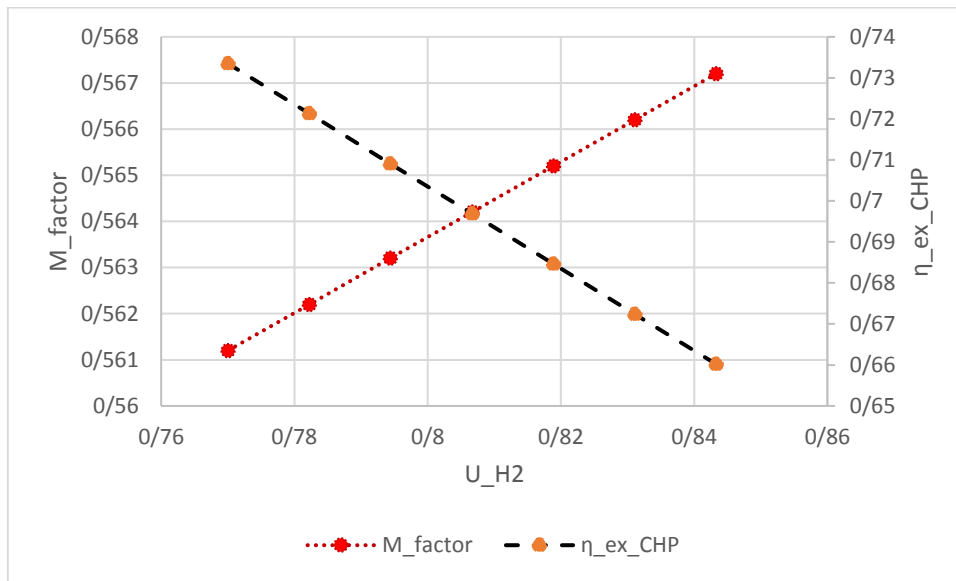
شکل (۴-۴)، نمودار بازده انرژی در حالت استفاده از برق و حرارت و فاکتور M در مقابل سوخت ورودی

در شکل (۴-۵)، رفتار بازده انرژی و فاکتور M در مقابل ضریب فاکتور کاتد بررسی شده است. با توجه به این شکل می‌توان بیان کرد که بازده انرژی سیستم با افزایش ضریب فاکتور کاتد نیز افزایش می‌یابد. در مقابل، فاکتور M به طور نامحسوس و ناچیزی کاهش می‌یابد. ضریب فاکتور کاتد معیاری جهت مقدار مصرف اکسیدنت در سمت کاتد می‌باشد. با افزایش مصرف الکترون در سمت کاتد، توان خروجی نیز افزایش یافته ولی حرارتی که از رابطه موازنه حرارتی از پیل محاسبه می‌شود کاهش می‌یابد. در مقابل آن حرارت خالص و قابل دسترس خروجی از پیل سوختی نرخ افزایشی بیشتر نسبت به کاهش حرارت خروجی ترمودینامیکی دارد و در نتیجه توان خروجی افزایش یافته و فاکتور M کاهش پیدا می‌کند.



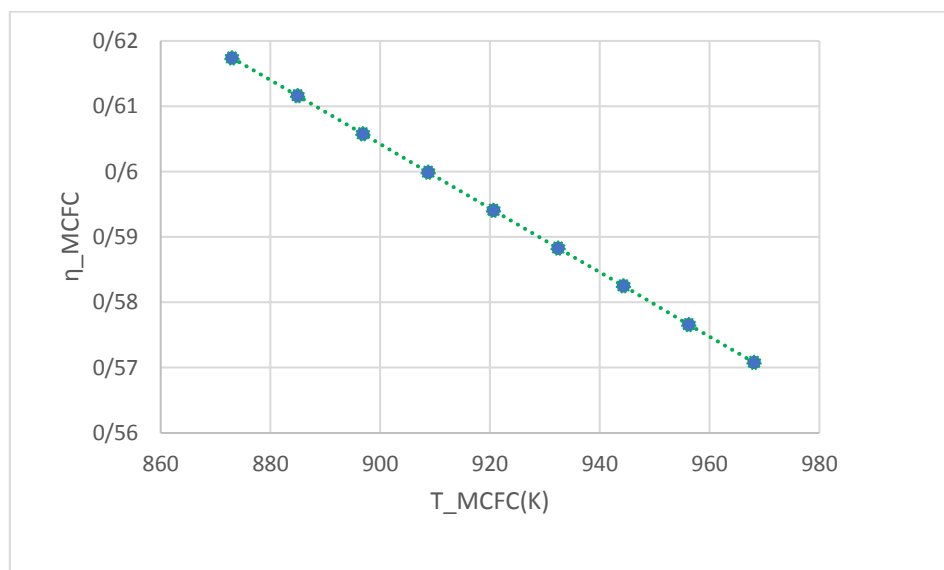
شکل (۴-۵)، تغییرات بازده اگزرژی و فاکتور M در مقابل مقدار مصرف ضریب کاتد

با تغییرات مقدار مصرف هیدروژن ورودی به پیل سوختی مقدار کار خروجی و هریک از بازده‌های سیستم طبیعتاً رخدادی نشان خواهند داد. در شکل (۴-۶)، با تغییر مقدار ضریب مصرف هیدروژن در پیل سوختی بازده اگزرژی پیل سوختی در حالت CHP روندی نزولی و فاکتور M نرخ افزایشی داشته است. با توجه به نتایج حاصله تاکنون، می‌توان اظهار کرد مقدار فاکتور M به ضریب مصرف هیدروژن وابسته است و نه به فاکتور مصرف در سمت کاتد و یا اکسیدنت. با توجه به شکل (۴-۶)، با افزایش مقدار مصرف ضریب هیدروژن، بازده اگزرژی سیستم به علت این که تخریب اگزرژی آن به مراتب افزایش می‌یابد، همواره نرخ کاهشی دارد. همچنین به علت این که حرارت خالص خروجی از پیل کاهش می‌یابد، فاکتور تعریف شده M نیز کاهش می‌یابد



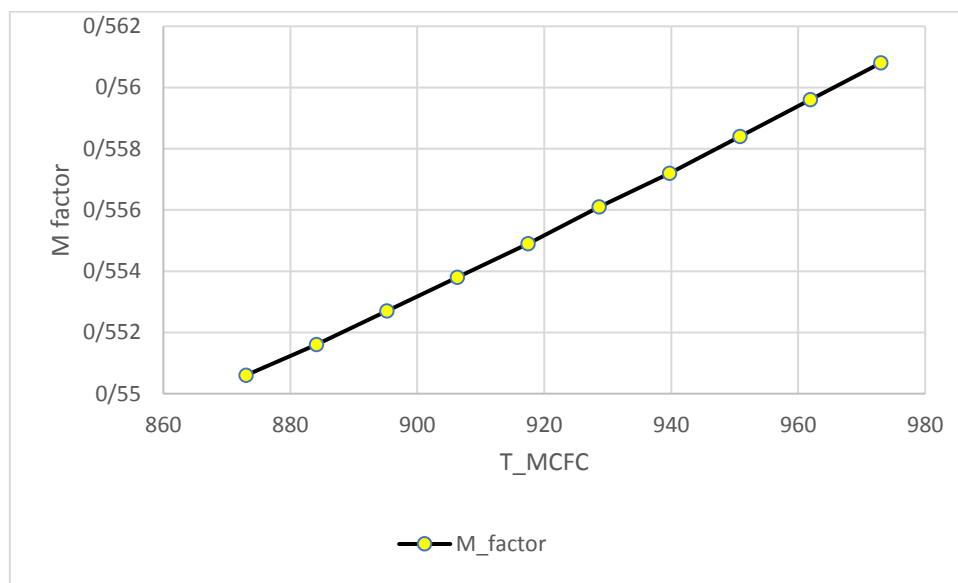
شکل (۴-۶)، تغییرات فاکتور M و بازده انرژی سیستم در حالت **CHP** با تغییر ضریب فاکتور هیدروژن

در شکل (۴-۷)، بازده انرژی الکتریکی در مقابل تغییرات دمای پیل سوختی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به این نمودار با افزایش دمای پیل سوختی همانطور که در نمودار (۴-۷) نشان داده شده است، به مراتب کاهش میابد. با افزایش دمای کاری پیل، تابع گیبس نیز کاهش یافته، و با کاهش این تابع، مقدار توان خروجی نیز کاهش میابد که علت کاهش بازده الکتریکی پیل سوختی می باشد.



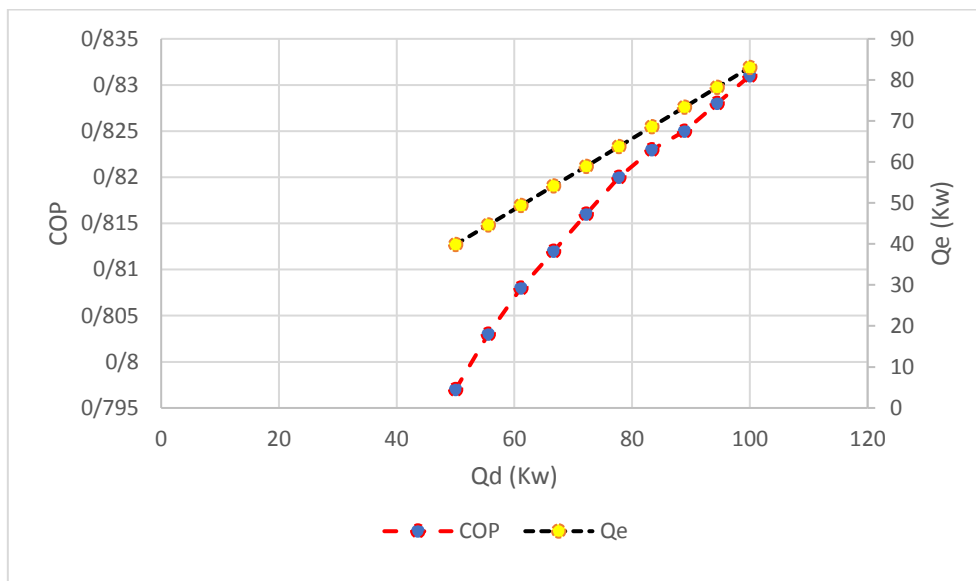
شکل (۴-۷)، تغییرات بازده انرژی و انرژی الکتریکی در مقابل تغییرات دمای پیل سوختی

نمودار تغییرات فاکتور M در برابر تغییرات دما در شکل (۴-۸)، ترسیم شده است. این فاکتور نسبت انرژی مورد تقاضا به کل انرژی دریافی از سیستم تولید همزمان را نشان می‌دهد. با افزایش دما به علت این که تابع گیس کاهش میابد، مقدار توان خروجی کاهش و حرارت خالص قابل دسترسی هم کاهش میابد. همچنین به علت این که نرخ کاهش حرارت خالص بیشتر از نرخ کاهش توان خروجی است، فاکتور تعریف شده M زیاد می‌شود.



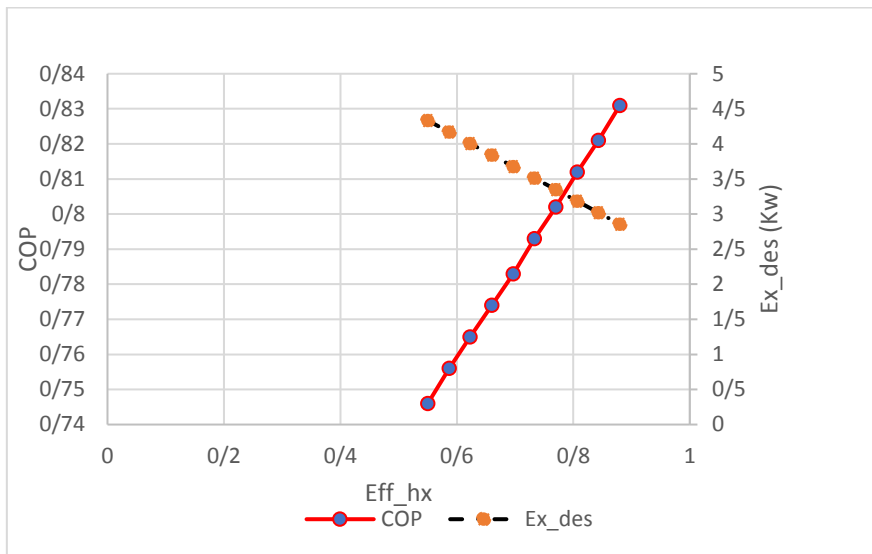
شکل (۴-۸)، تغییرات بازده انرژی الکتریکی و فاکتور M در مقابل تغییرات دما

تغییرات COP و Q_e در مقابل افزایش گرمای ورودی به ژنراتور در شکل (۴-۹)، مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به شکل (۴-۹)، با افزایش گرمای ورودی به ژنراتور در چیلر جذبی مقدار ضریب عملکرد و برودت خروجی از اواپراتور نیز افزایش میابد. بر اساس رابطه ضریب عملکرد چیلر جذبی انرژی مطلوب، مقدار برودت خروجی از اواپراتور می‌باشد که هرچه مقدار گرمای ورود به ژنراتور بیشتر باشد برودت خروجی از اواپراتور نیز بیشتر می‌شود. این رابطه نیز در مورد چیلرهای جذبی دو اثره و سه اثره نیز حاکم است اما مقدار ضریب عملکرد این گونه چیلرها نیز بیشتر است.



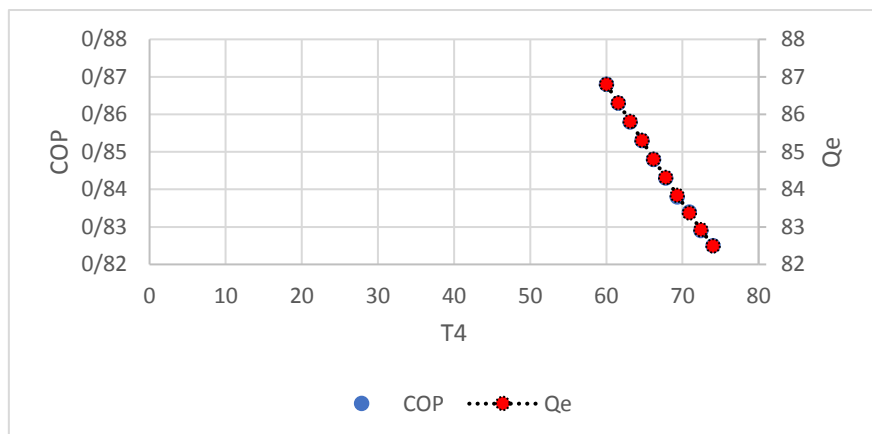
شکل (۴-۹)، تغییرات **cop** و **Qe** در مقابل افزایش گرمای ورودی به ژنراتور در چیلر جذبی

در چیلرهای جذبی از آنجایی که قسمت اواپراتور و ابزوربر به یکدیگر راه دارند، بخار آب تولید شده در اواپراتور به ابزوربر منتقل می‌شود و با پاشش لیتیوم بروماید غلیظی که از ژنراتور به مبدل حرارتی و سپس به اسپری های ابزوربر منتقل می‌شود و به دلیل خاصیت جاذب بودن لیتیوم بخار تولید شده در قسمت اواپراتور جذب لیتیوم بروماید شده و محلول رقیق می‌گردد. بر این اساس بازده مبادله‌گر می‌تواند نقش کلیدی در ضریب عملکرد و تخریب اگزرژی چیلر جذبی داشته باشد. در شکل (۴-۱۰)، تغییرات ضریب عملکرد و تخریب اگزرژی چیلر جذبی در مقابل بازده مبادله‌گر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به شکل (۴-۱۰)، می‌توان ادعان کرد که با افزایش بازده مبادله‌گر ضریب عملکرد و تخریب اگزرژی چیلر جذبی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. با افزایش بازده مبادله‌گر نرخ تخریب اگزرژی مبادله‌گر کم شده و به همین ترتیب با اثر گذاشتن بر کل سیکل چیلر جذبی این تخریب اگزرژی نیز کاهش می‌یابد که امری مطلوب از نظر مصرف‌کننده می‌باشد. همچنین با افزایش بازده مبادله‌گر دمای نقطه ۴ که ورودی به ژنراتور می‌باشد، ثابت است و تغییر نمی‌کند، با توجه به رابطه (۳-۳۲) دمای نقطه هم کاهش یافته اما دمای نقطه ۱۰ ثابت است که با کاهش دمای نقطه ۷، تخریب اگزرژی کاهش و به تبع آن ضریب عملکرد افزایش می‌یابد.



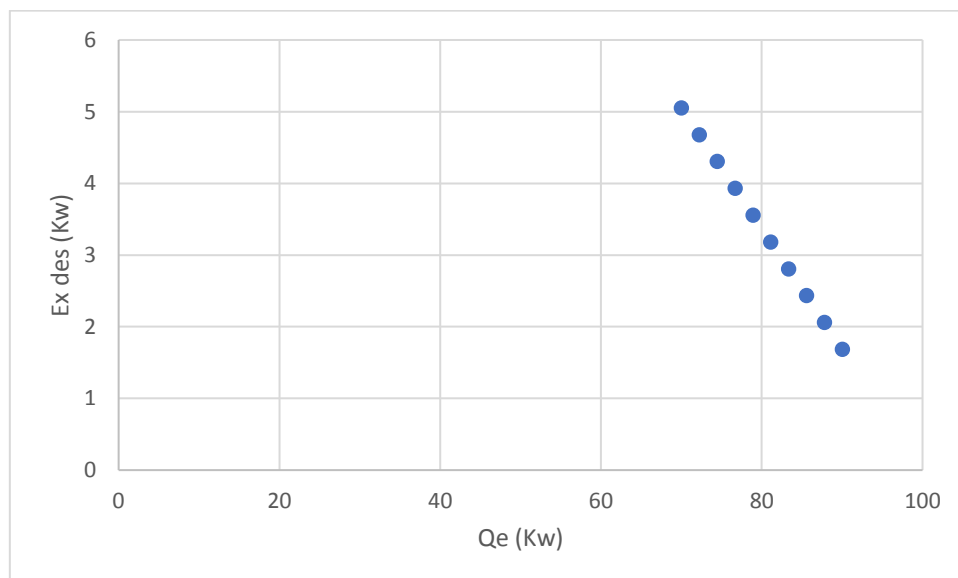
شکل (۴-۱۰)، نمودار ضریب عملکرد و تخریب انرژی چیلر جذبی در مقابل بازده مبادله گر

دمای سیال خروجی از ژنراتور پارامتر ورودی دیگری است که بر اساس تغییر آن سیکل چیلر جذبی رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴-۱۰)، با افزایش بازه‌ای از دمای خروجی ژنراتور، برودت مطلوب خروجی و به تبع آن ضریب عملکرد چیلر جذبی نیز کاهش پیدا می‌کند. دمای خروجی از ژنراتور (T_4) در سیکل چیلر جذبی دمای مبرد است که برای گرم شدن وارد ژنراتور می‌شود. علت این تغییر این است که غلظت در نقطه ۹ صفر است، یعنی همه سیال موجود در آن نقطه به صورت سیال آب است. با افزایش دمای نقطه ۴ دبی جرمی نقطه ۹ کاهش یافته (دبی جرمی کمتری وارد اواپراتور می‌شود) و در نتیجه برودت خروجی اواپراتور کاهش و به تبع آن ضریب عملکرد نیز کاهش می‌یابد.



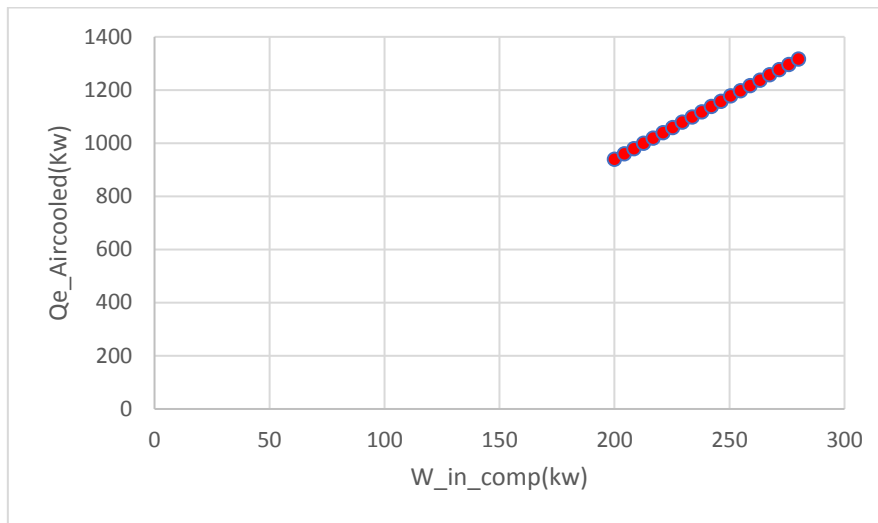
شکل (۴-۱۰)، بررسی ضریب عملکرد و برودت خرجی از اواپراتور بر حسب تغییر دمای خروجی از ژنراتور

تا کنون عوامل موثر بر کاهش و یا افزایش برودت اواپراتور در چیلر جذبی مورد بررسی قرار گرفته است. باید در این قسمت به بررسی تغییر مقدار برودت مطلوب بر حسب تخریب اگزرژی چیلر جذبی مورد بحث قرار می‌گیرد. شکل (۴-۱۱)، تغییرات برودت اواپراتور در چیلر جذبی را بر حسب تخریب اگزرژی چیلر جذبی را نیز نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۴-۱۱) مشاهده می‌شود، با افزایش برودت خروجی از اواپراتور مقدار اختلاف اگزرژی ورودی و خروجی در اواپراتور کاهش و به تبع در سیکل چیلر جذبی، تخریب اگزرژی نیز کاهش می‌یابد.

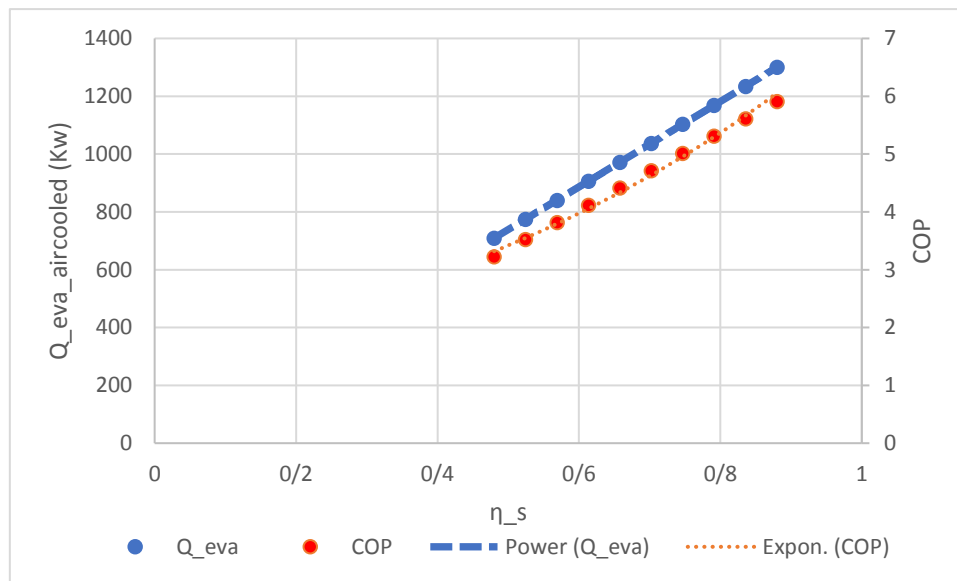


شکل (۴-۱۱)، نمودار تغییر برودت اواپراتور بر حسب تخریب اگزرژی سیکل چیلر جذبی تک اثره

مقدار توان ورودی به کمپرسور و خروجی برودت اواپراتور در چیلرهای تراکمی، یکی دیگر از پارامترهای اصلی سیکل مورد مطالعه می‌باشد. بر این اساس با توجه به شکل (۴-۱۲)، با افزایش مقدار توان ورودی به کمپرسور مقدرا برودت با توجه به رابطه (۳-۵۲) نیز افزایش می‌یابد.



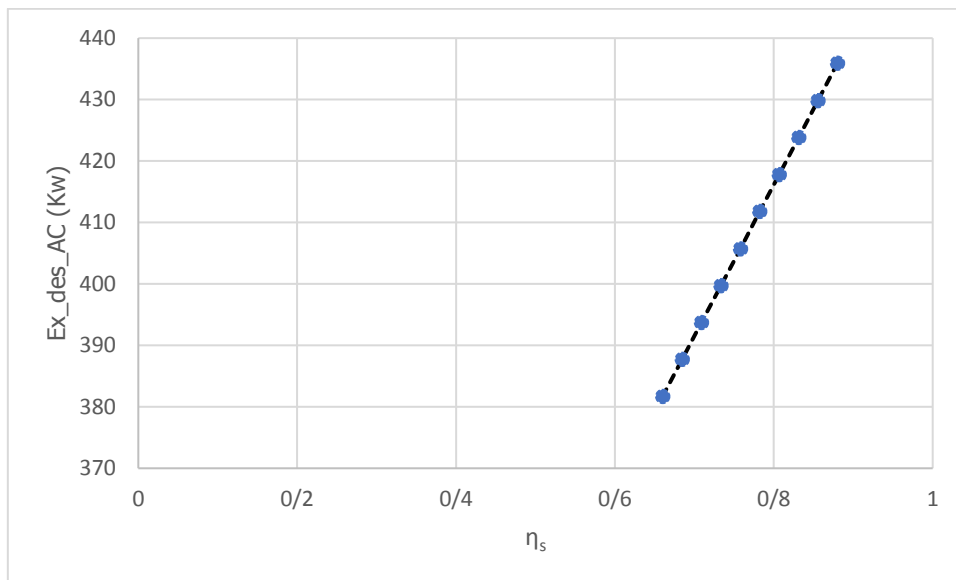
شکل (۴-۱۲)، نمودار تغییر برودت خروجی از اوپراتور بر اساس توان ورودی به چیلر تراکمی



شکل (۴-۱۳)، مقایسه ضریب عملکرد و برودت خروجی بر اساس تغییر بازده ایزنتروپیک کمپرسور

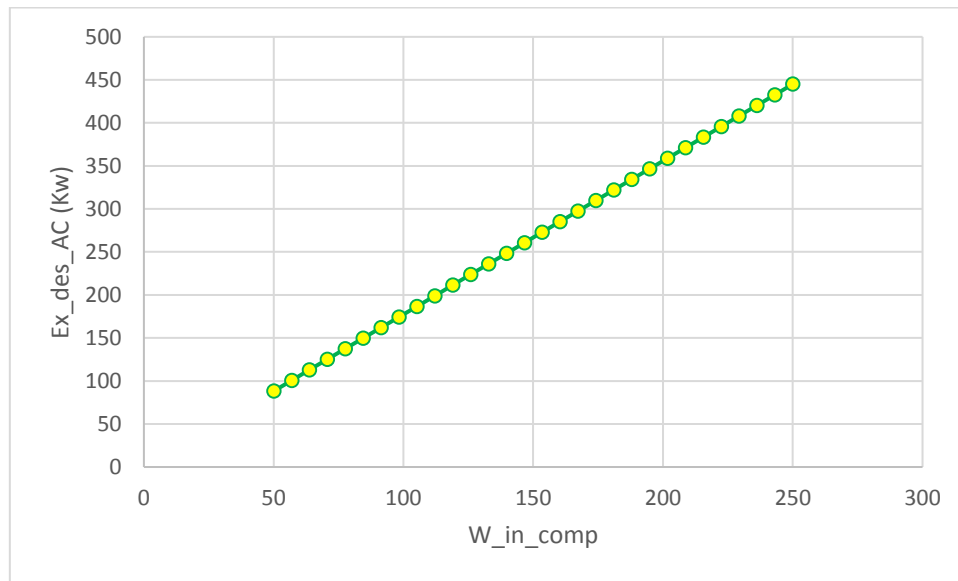
بازده ایزنتروپیک کمپرسور در چیلر تراکمی هواخنک مورد مطالعه ۰/۷ در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۴-۱۳) مشاهده می‌شود، با افزایش بازده ایزنتروپیک کمپرسور ضریب عملکرد چیلر و برودت خروجی از اوپراتور بیشتر می‌شود که علت آن این است که با افزایش بازده ایزنتروپیک کمپرسور عملکرد بهتری خواهد داشت و به تبع آن ضریب عملکرد سیکل تراکمی نیز افزایش می‌یابد. از طرفی بیشتر شدن بازده ایزنتروپیک اثری بر تخریب آگزرژی چیلر می‌گذارد. به همین علت در شکل (۴-۱۴)، به اثر تغییر بازده ایزنتروپیک بر روی

تخریب انرژی پراکنده شده است. همان طور که در شکل (۴-۱۴)، مشاهده می شود، با افزایش بازده آیزنتروپیک کمپرسور به دلیل این که برودت خروجی از چیلر افزایش میابد، تخریب انرژی سیری صعودی را طی می کند.



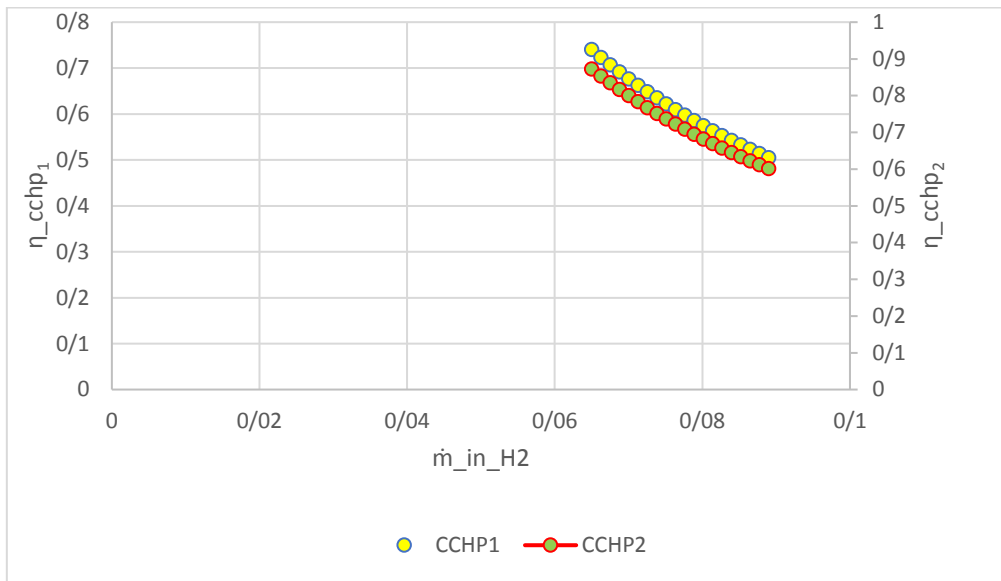
شکل (۴-۱۴)، تغییرات اثر بازده آیزنتروپیک چیلر تراکمی بر روی تخریب انرژی چیلر

پارامتر بعدی که در چیلر تراکمی مورد مطالعه بررسی شده است، اثرات توان ورودی به چیلر تراکمی بر روی تخریب انرژی چیلر است. بر همین اساس با توجه به شکل (۴-۱۵)، با افزایش کار ورودی به چیلر تراکمی برودت خروجی نیز افزایش یافته و چون طبق رابطه موازنه انرژی اختلاف بین انرژی ورودی و خروجی زیاد می شود، نرخ تخریب انرژی چیلر تراکمی نیز به مراتب افزایش میابد.



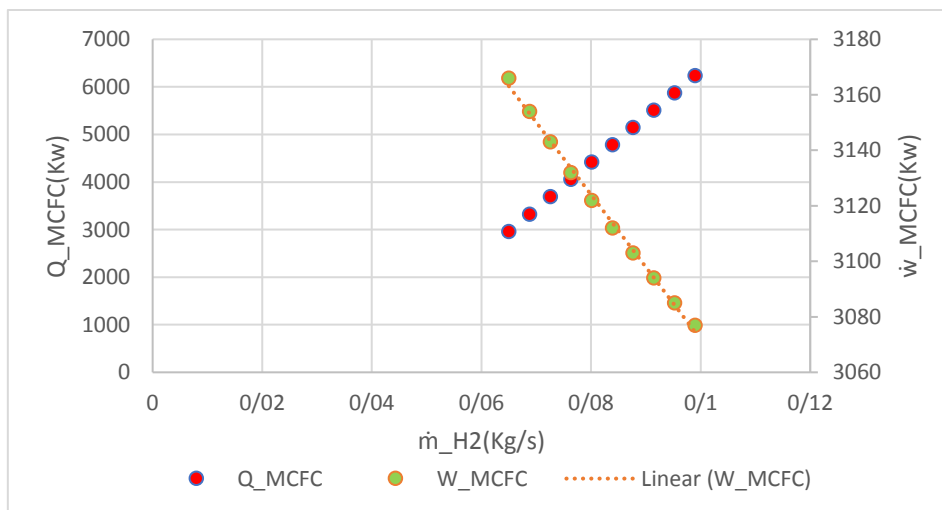
شکل (۴-۱۵)، اثر کار ورودی به چیلر تراکمی بر روی تخریب انرژی چیلر

همانطور که از سیکل کلی پیشنهادی در این پژوهش واضح است، به وسیله دو چیلر تراکمی و جذبی برودت مطلوب به دست آمده است. براین اساس سیستم $CCHP_1$ و $CCHP_2$ به ترتیب جهت نام گذاری سیستم فقط با چیلر جذبی و سیستم با چیلر تراکمی و جذبی استفاده شده است. با توجه به سوخت ورودی به پیل سوختی بازده انرژی سیکل در حالت $CCHP_1$ و $CCHP_2$ متفاوت خواهد بود. در شکل (۴-۱۶)، تغییرات سیکل تولید همزمان در حالت اول و دوم بر اساس تغییرات سوخت مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به شکل (۴-۱۶)، با افزایش سوخت هیدروژن ورودی به علت این که توان خروجی کاهش میابد، بازده انرژی در دو حالت $CCHP_1$ و $CCHP_2$ کاهش میابد.



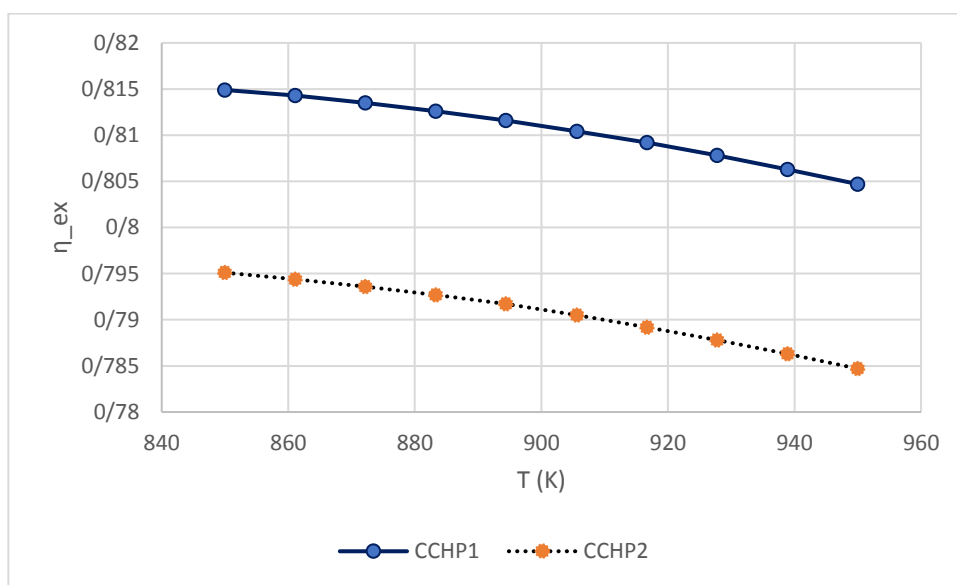
شکل (۴-۱۶)، نمودار تغییرات بازده انرژی سیکل در حالت استفاده از جذبی و چیلر تراکمی-جذبی

با افزایش مقدار سوخت ورودی به پیل سوختی مقادیر حرارت و کار خروجی نیز متفاوت خواهد بود. با توجه به شکل (۴-۱۷)، با افزایش مقدار سوخت هیدروژن ورودی به پیل سوختی مقادیر توان و حرارت خروجی از پیل سوختی با توجه به معادلات توان و حرارت به ترتیب کاهش و افزایش میابد.



شکل (۴-۱۷)، مقایسه کار و حرارت خروجی براساس سوخت ورودی

همچنین در شکل (۴-۱۸) نمودار تغییرات بازده انرژی سیکل تولید همزمان در حالت اول و دوم براساس تغییرات دمای کاری پیل سوختی نیز ارزیابی شده است. با توجه به شکل (۴-۱۸) با افزایش دمای کاری پیل سوختی به علت این که توان خروجی کاهش میابد، بازده انرژی سیکل در حالت اول و دوم کاهش میابد.



شکل (۴-۱۸)، اثر دما بر روی بازده انرژی سیستم

با توجه به مقادیر مختلف بازده‌های محاسبه شده برای سیستم، در جدول (۴-۱۰)، خلاصه‌ی بازده‌های مورد مطالعه در این پژوهش مورد آرایه شده است.

جدول (۴-۱۲)، خلاصه بازده‌های محاسبه شده

پارامتر	سیستم مورد بررسی	مقدار	واحد	نماد/حالت
بازده انرژی	پیل سوختی	59.71	%	η_{elec}
بازده انرژی	CHP	76.76	%	η_{CHP}
بازده انرژی	CCHP ₁	78.23	%	η_{CCHP_1}
بازده انرژی	CCHP ₂	79.78	%	η_{CCHP_2}
بازده انرژی	پیل سوختی	49.94	%	RE_{elec}
بازده انرژی	CHP	81.22	%	RE_{CHP}
بازده انرژی	CCHP ₁	81.44	%	RE_{CCHP_1}
بازده انرژی	CCHP ₂	81.68	%	RE_{CCHP_2}

۴-۶ تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان پیل سوختی کربنات مذاب

در نظریه احتمالات، قوانین متعددی وجود دارد که رابطه عملی بین متغیر تصادفی X و احتمال آن $P(X)$ را نشان می‌دهد هر عملی که مداوم در طبیعت تکرار می‌شود از یک توزیع مشخصی پیروی می‌کند.^۱ بیش از ۳۰ توزیع در علم ریاضی و آمار وجود دارد که هر کدام، شاخص‌های جهت انتخاب توزیع مناسب دارند. در کل سه نوع شاخص اصلی ارزیابی در انتخاب توزیع مناسب وجود دارد. این شاخص‌ها شامل کولموگروو-اسمیرنور^۲، اندرسون-دارلینگ^۳ و کای اسکویر^۴ می‌باشند. با استفاده از نرم افزار EasyFit مربوطه نتایج حاکی از آن است که داده‌های مربوطه از توزیع وایبل^۵ تبعیت می‌کنند. یک سری داده می‌تواند با یک، دو و حتی سه شاخص ارزیابی شود و این ارزیابی بر اساس ساعات کاری مختلف یک سیستم می‌باشد. داده‌های داده شده به نرم افزار با توجه به شکل از هر سه شاخص می‌تواند بررسی شود. همانطور که در شکل (۴-۱۹) مشاهده می‌شود، این داده‌ها به خوبی با توزیع وایبل فیت شده و با هر سه شاخص می‌تواند ارزیابی شود.

^۱ [16] جهت اطلاعات بیشتر به رفرنس مربوطه مراجعه شود

^۲ Kolmogorov-Smirnov

^۳ Anderson-Darling

Chi-Squared^۴

Weibull Distribution^۵

Goodness of Fit - Details [hide]

Weibull [#63]					
Kolmogorov-Smirnov					
Sample Size	50				
Statistic	0.14348				
P-Value	0.23149				
Rank	28				
α	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Critical Value	0.1484	0.16959	0.18841	0.21068	0.22604
Reject?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Sample Size	50				
Statistic	1.1875				
Rank	17				
α	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Critical Value	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Reject?	No	No	No	No	No
Chi-Squared					
Deg. of freedom	4				
Statistic	1.1679				
P-Value	0.88336				
Rank	1				
α	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Critical Value	5.9886	7.7794	9.4877	11.668	13.277
Reject?	No	No	No	No	No

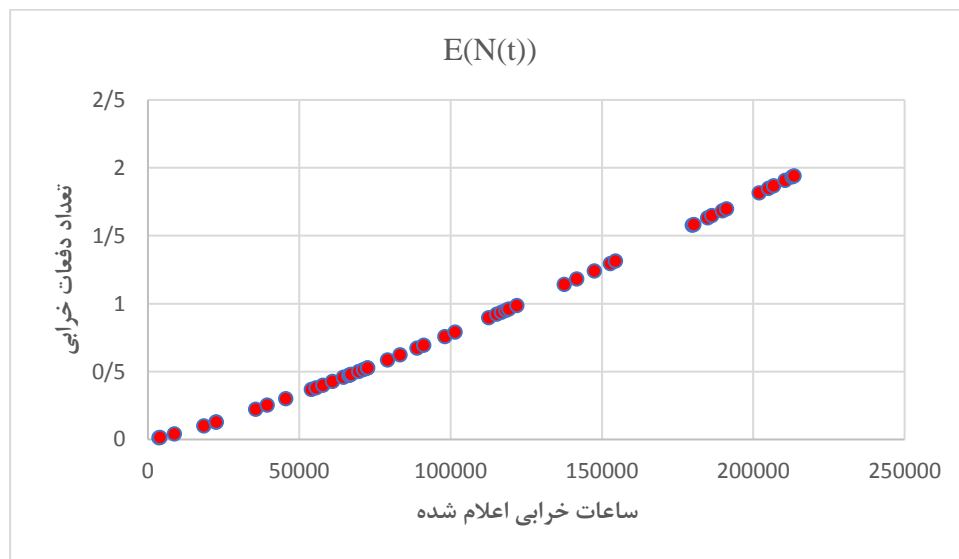
شکل (۴-۱۹) صحت استفاده از **Weibull Distribution**

محاسبات تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم در جدول زیر به طور خلاصه آورده شده است.

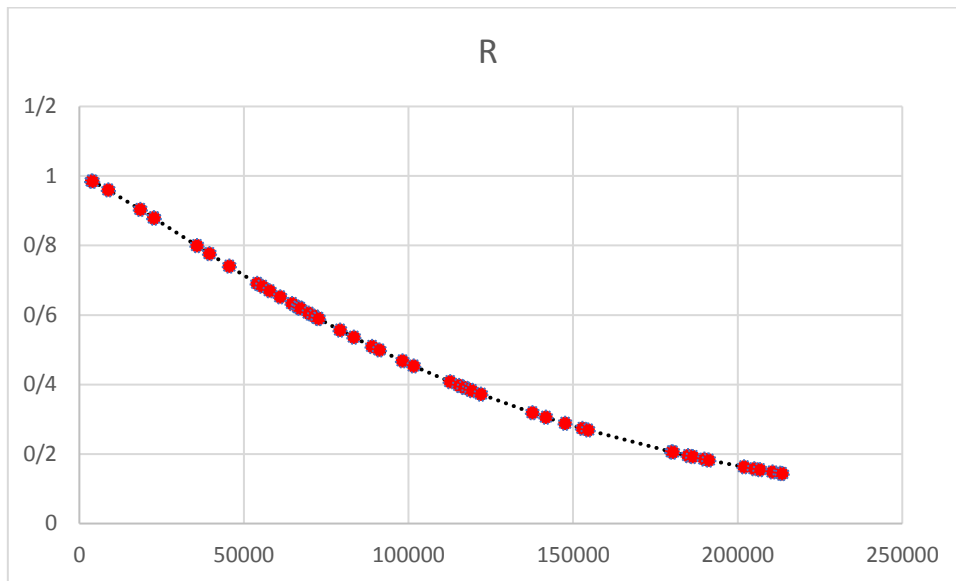
جدول (۴-۱۳)، محاسبات تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم

i	ساعت کاری	f	$R(t)$	$E(N(t))$
1	3710	4.67547E-06	0.985543675	0.014561836
2	3969	4.73537E-06	0.984326151	0.015797983
3	8715	5.43475E-06	0.959987482	0.040835034
4	18501	5.97811E-06	0.903628983	0.10133642
5	22533	6.05975E-06	0.879349895	0.1285724
6	22637	6.06118E-06	0.87871977	0.129289238
7	35657	6.05841E-06	0.79949412	0.223776102
8	39463	6.00917E-06	0.776525108	0.252926302
9	45567	5.9008E-06	0.740158748	0.300890592
10	54005	5.7073E-06	0.691150097	0.369398261
11	55567	5.66729E-06	0.682265254	0.382336761
12	57798	5.6083E-06	0.669685164	0.400947582
13	61019	5.51981E-06	0.651759479	0.428079682
14	64569	5.41841E-06	0.632339546	0.458328772
15	66407	5.36456E-06	0.622427928	0.474127436
16	66662	5.35702E-06	0.62106065	0.476326537
17	67128	5.34322E-06	0.618566984	0.480349793
18	69654	5.26756E-06	0.605162461	0.502258327
19	71262	5.21876E-06	0.596729525	0.516291326
20	72495	5.18105E-06	0.590316551	0.527096358
21	72602	5.17777E-06	0.589762227	0.528035829
22	79203	4.97236E-06	0.556250771	0.586536059
23	83319	4.8423E-06	0.53604647	0.623534425
24	88938	4.6636E-06	0.50933179	0.674655629
25	91124	4.59398E-06	0.49921031	0.69472781
26	98083	4.37295E-06	0.46800131	0.759284184
27	101504	4.26504E-06	0.453221594	0.791374104
28	112639	3.91984E-06	0.40764745	0.897352571
29	115296	3.8392E-06	0.397336351	0.922972125
30	116844	3.79258E-06	0.39142744	0.937955118
31	118316	3.7485E-06	0.3858754	0.95224076
32	119260	3.72037E-06	0.382348932	0.961421652
33	121949	3.64084E-06	0.372448709	0.987655944
34	137592	3.19732E-06	0.318990871	1.142592793
35	141657	3.08785E-06	0.306212972	1.183474434
36	147503	2.93483E-06	0.28860565	1.242694056
37	152754	2.80192E-06	0.273541045	1.296303596
38	154532	2.75789E-06	0.268596946	1.314543366
39	179909	2.184E-06	0.20608913	1.579446536
40	180346	2.175E-06	0.205136458	1.584079874
41	184916	2.08265E-06	0.195406657	1.632672473
42	186369	2.05395E-06	0.192400776	1.64817471
43	189807	1.98732E-06	0.185452817	1.684954785
44	191189	1.96104E-06	0.18272396	1.699778682
45	201929	1.76632E-06	0.16271928	1.815728769
46	205048	1.71287E-06	0.157292952	1.849645273
47	206728	1.68465E-06	0.154438649	1.867958354
48	210495	1.62278E-06	0.148208817	1.909133073
49	212843	1.5852E-06	0.144442295	1.934875191
50	213452	1.57557E-06	0.143479722	1.941561567

با توجه به جدول (۴-۱۱)، سیستم با احتمال ۹۸٪ در طی بازه زمانی ۳۷۱۰ ساعت اولیه به طور کامل کار می‌کند و در این بازه زمانی از سیستم اصلاً انتظار خرابی نمی‌رود. این نکته را میتوان از $E[N(t)]$ هر ساعت کاری متوجه شد. این روند در شکل (۴-۲۸)، به طور کامل قابل درک می‌باشد. با گذشت زمان احتمال کارکرد بدون نقص سیستم به مراتب کاهش یافته تا به ساعت کاری ۱۲۱۹۴۹ برسد. در این بازه زمانی احتمال اینکه سیستم خراب نشود برابر ۳۷٪ می‌باشد و بدین معنی است که سیستم به احتمال ۶۷٪ در بازه زمانی ۱۲۱۹۴۹ ساعت کاری خراب خواهد شد. در قبل از بازه زمانی ۱۳۷۵۹۲ ساعت کاری اولین خرابی را میتوان از سیستم انتظار داشت. دومین خرابی سیستم بعد از ساعت کاری ۲۱۳۴۵۲ از سیستم انتظار می‌رود و همچنین MTTF سیستم در ساعت کاری ۱۳۷۵۹۲ اتفاق می‌افتد. بدین معنی می‌باشد که متوسط زمان تا اولین خرابی در این سیستم ۱۳۷۵۹۲ می‌باشد. همان طور که در شکل (۴-۲۸)، ملاحظه می‌شود، $R(t)$ سیستم از احتمال ۹۸٪ شروع شده و با گذشت زمان این مقدار به طور تدریجی به صفر نزدیک می‌شود.



شکل (۴-۲۰)، نمودار ساعت کارکرد پیل سوختی بر حسب تعداد دفعات خرابی



شکل (۴-۲۱)، نمودار ساعت کارکرد پیل سوختی بر حسب احتمال کارکرد پیل به طور موفق

۴-۷ تحلیل اقتصادی سیستم

جهت ارزیابی اقتصادی سیکل پیشنهادی در این پژوهش لازم است ابتدا هزینه‌های ثابت و متغیر تعیین شود.

این نوع هزینه‌ها در جدول (۴-۱۴) ارائه شده‌اند.

جدول (۴-۱۴)، بررسی هزینه‌های ثابت و متغیر

واحد	مقدار هزینه	نوع هزینه	هزینه مربوطه
\$	۳۰۰۰	ثابت	خرید پیل سوختی [۶۷]
$\frac{\$}{Kw-h}$	۱۶۰	ثابت	چیلر جذبی [۵]
$\frac{\$}{Kw-h}$	۱۴۰	ثابت	چیلر تراکمی [۶۸]
$\frac{\$}{1000 lb}$	۱۱/۶۷	متغیر	تولید بخار آب [۶۶]
$\frac{\$}{kg}$	۱/۳۵	متغیر	گاز کربن دی‌اکسید [۶۹]
$\frac{\$}{Kw-h}$	۰/۰۲	متغیر	نگهداری پیل
$\frac{\$}{Kw-h}$	۰/۰۸	متغیر	نگهداری چیلر تراکمی [۶۸]
$\frac{\$}{Kw-h}$	۰/۰۱	متغیر	نگهداری چیلر جذبی [۵]

ساعات کاری سیستم جهت ارزیابی اقتصادی باید تعیین شود که هرجز سیستم در ماه ۳۳۳/۳ ساعت کار می‌کنند. هزینه فروش برق، حرارت و برودت هرکدام ۰/۱۲ دلار بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است. مقادیر صرفه جویی، مخارج و هزینه سرمایه‌ای در مصرف انرژی که همان سود کاربر از راه‌اندازی سیستم بدست می‌آید، مطابق جدول (۴-۱۵) می‌باشد.

جدول (۴-۱۵)، مخارج و هزینه‌های سرمایه‌ای از راه‌اندازی

نوع هزینه	مقدار هزینه	واحد
فروش برق	+۱۲۸۹۶۰	\$/month
فروش حرارت	+۷۴۶۸۰	\$/month
فروش برودت (جذبی)	+۱۶۶۸	\$/month
فروش برودت (تراکمی)	+۲۲۳۸	\$/month
سرمایه‌ای	-۴۹۱۵۱۸۰۰	\$
مخارج و نگهداری	-۴۱۸۹۲۲۱۲	\$/year

پارامترهای بازگشت سرمایه و ارزش پول سرمایه‌گذاری در جدول (۴-۱۶)، آورده شده است.

جدول (۴-۱۶)، بررسی پارامتر بازگشت سرمایه و ارزش پول سرمایه‌گذاری شده

نوع پارامتر	مقدار	واحد
بازگشت سرمایه	۳/۵۵	year
ارزش حال پول (طی پنج سال)	۷۷۰۲۳۴۴/۲۸۶	\$
ارزش آینده پول پول (طی پنج سال)	۱۲۵۴۶۳۰۷/۲۲	\$

حال اگر جهت تامین هزینه‌ی سیکل پیشنهادی از وام استفاده شود، بهره‌ها یا ساده خواهند بود و یا مرکب. براین اساس در جدول (۴-۱۷)، نوع، مقدار و بازپرداخت در طی زمان ۵ ساله اریه شده است. لازم به‌ذکر است که ارزش پول در بهره ساده و مرکب به‌ترتیب ۱۲۲۸۷۹۵۰ و ۱۱۲۹۷۷۷۴/۵ دلار می‌باشد و در هزینه بازپرداخت در انتهای سال پنجم، هزینه اسقاط اجزای سیستم از بازپرداخت کم شده است.

جدول (۴-۱۷)، محاسبه نرخ بهره ساده و مرکب هنگام دریافت وام

نوع بهره	نوع بازپرداخت	مقدار بازپرداخت	واحد
ساده	ماهانه	۲۵۴۶۱۱۹۱/۳	\$
مرکب	سالانه/اول	۵۱۶۰۹۳۹۰	\$
مرکب	سالانه/دوم	۵۴۱۸۹۸۵۹/۵	\$
مرکب	سالانه/سوم	۵۶۸۹۹۳۵۲/۴۸	\$
مرکب	سالانه/چهارم	۵۹۷۴۴۳۲۰/۱	\$
مرکب	سالانه/پنجم	۶۲۳۹۸۶۴۵/۲۲	\$

با اعمال نرخ تنزیل و نرخ تورم، ارزش حال پول و ارزش حال خالص پول را می‌توان محاسبه کرد. در جدول

(۴-۱۸)، نرخ تنزیل و نرخ تورم بر روی هزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول (۴-۱۸)، بررسی نرخ‌های تنزیل و تورم

سال	فاکتور تنزیل ۵٪	صرفه‌جویی خالص	ارزش حال	نرخ تورم ۳٪	صرفه‌جویی خالص	ارزش حال	ارزش واقعی
0	1	49151800	-49151800	1	-9830360	-49151800	-9830360
1	0.952380952	55496952	52854240	0.9708737 86	55718256	54408776.47	54625741.18
2	0.907029478	55496952	50337371.43	0.9425959 09	55718256	53341937.72	53554648.21
3	0.863837599	55496952	47940353.74	0.9151416 59	55718256	52296017.37	52504557.07
4	0.822702475	55496952	45657479.75	0.8884870 48	55718256	51270605.26	51475055.95
5	0.783526166	55496952	43483314.05	0.8626087 84	55718256	50265299.28	50465741.13
6	0.746215397	55496952	41412680.05	0.8374842 57	55718256	49279705.17	49476216.79
7	0.71068133	55496952	39440647.67	0.8130915 11	55718256	48313436.45	48506094.9
8	0.676839362	55496952	37562521.59	0.7894092 34	55718256	47366114.16	47554995
9	0.644608916	55496952	35773830.08	0.7664167 32	55718256	46437366.83	46622544.11
10	0.613913254	55496952	34070314.36	0.7440939 15	55718256	45526830.22	45708376.58
11	0.584679289	55496952	32447918.44	0.7224212 77	55718256	44634147.28	44812133.9
12	0.556837418	55496952	30902779.47	0.7013798 8	55718256	43758967.92	43933464.61
13	0.530321351	55496952	29431218.54	0.6809513 4	55718256	42900948.94	43072024.13
14	0.505067953	55496952	28029731.94	0.6611178 06	55718256	42059753.86	42227474.64
15	0.481017098	55496952	26694982.8	0.6418619 47	55718256	41235052.81	41399484.94
16	0.458111522	55496952	25423793.15	0.6231669 39	55718256	40426522.36	40587730.33
17	0.436296688	55496952	24213136.33	0.6050164 46	55718256	39633845.45	39791892.48
18	0.415520655	55496952	23060129.84	0.5873946 08	55718256	38856711.22	39011659.3
19	0.395733957	55496952	21962028.42	0.5702860 27	55718256	38094814.93	38246724.8
20	0.376889483	55496952	20916217.54	0.5536757 54	55718256	37347857.77	37496789.02
21	0.358942365	55496952	19920207.18	0.5375492 76	55718256	36615546.83	36761557.86
22	0.341849871	55496952	18971625.89	0.5218925 01	55718256	35897594.94	36040743
23	0.325571306	55496952	18068215.13	0.5066917 48	55718256	35193720.52	35334061.77
24	0.31006791	55496952	17207823.93	0.4919337 36	55718256	34503647.57	34641237.03

25	0.295302772	55496952	16388403.75	0.4776055 69	55718256	33827105.46	33961997.08
----	-------------	----------	-------------	-----------------	----------	-------------	-------------

ارزش حال خالص پول (NPV) در جدول (۴-۱۹)، گزارش شده است.

جدول (۴-۱۹)، محاسبه ارزش حال خالص پول

NPV	درصد فاکتور	نوع فاکتور
۷۷۵۴۵۹۶۵۱/۴	۵٪	تنزیل
۹۶۰۳۹۹۸۶۰/۸	۳٪	تورم
۱۰۷۷۹۸۲۵۸۶	۲٪	تنزیل واقعی

فصل پنجم

تیج گیری

۵-۱ مقدمه

سیستم‌های تولید همزمان دارای مزایای عمده اقتصادی و زیست محیطی هستند. به همین علت استفاده از این سیستم‌ها در کاربردهای صنعتی و مسکونی جهت تامین برق، حرارت و برودت روزانه در حال افزایش است. از طرف دیگر از تانک‌های ذخیره حرارتی و چیلرهای جذبی و تراکمی می‌توان برای بازیافت حرارت و برق پیل‌های سوختی استفاده نمود. در این پژوهش سیستم تولید همزمان سه‌گانه با کمک نرم‌افزار EES مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

۵-۲ نتیجه‌گیری انرژی

- پیل سوختی مورد بررسی در این پژوهش دارای توان الکتریکی ۳۰۵۵ و گرمای ۲۴۵۴ کیلووات است. که از این حین ۱۲۵,۸۳ کیلووات حرارت آن به چیلر جذبی داده می‌شود و مابقیه حرارت جهت گرمایش استفاده می‌شود. برق تولیدی نیز جهت استفاده در شبکه قرار می‌گیرد. خروجی اواپراتور ۱۵۰/۷۳۷ کیلووات و ضریب عملکرد چیلر جذبی ۰.۸۴ محاسبه شد.
- راندمان انرژی پیل سوختی به‌تنهایی و در حالت CHP به ترتیب ۵۹/۷۱٪ و ۷۶/۷۶٪ به‌دست آمد. راندمان انرژی سیستم CCHP در حالت اول که تنها از چیلر جذبی استفاده می‌شود ۷۸/۲۳٪ محاسبه شد.
- با اضافه کردن چیلر تراکمی به سیکل مذکور راندمان انرژی سیکل از ۷۸/۲۳ به ۷۹/۷۸٪ ارتقا یافت. اما با افزایش دمای کاری پیل سوختی بازده انرژی آن به مراتب کاهش می‌یابد.
- ضریب عملکرد انرژی سیکل چیلر تراکمی ۳/۶۱۱ بدست آمد و خروجی سرمایش ۱۱۱/۹ کیلووات بود. جهت راه اندازی این چیلر تراکمی ۳۱ کیلووات برق خروجی از پیل سوختی وارد چیلر تراکمی شد.

۵-۳ نتیجه گیری اگزرژی

- راندمان اگزرژی پیل سوختی به تنهایی ۴۲٪ درصد بود. بیشترین نرخ تخریب اگزرژی را پیل سوختی در برمی گیرید و بعد از به ترتیب چیلر تراکمی و چیلر جذبی در رتبه دوم و سوم قرار می گیرند. تخریب اگزرژی های محاسبه شده به ترتیب ۳/۲۵۶، ۴۲/۴۷ و ۳۱۱۲ برای چیلر جذبی، تراکمی و پیل سوختی محاسبه شد.
- بازده اگزرژی چیلر جذبی و تراکمی به ترتیب ۸۱/۴ و ۳۹/۴۷ محاسبه شد.
- راندمان اگزرژی سیکل در حالتی که تنها از برق و حرارت استفاده شود ۸۱/۲۲٪ و در حالتی که فقط از چیلر جذبی استفاده شود این بازده به ۸۱/۴۴٪ افزایش پیدا کرد.
- چیلر تراکمی نیز جهت افزایش بار برودت به سیکل پیشنهادی اضافه شد. بر این اساس با به کار گیری چیلر جذبی و تراکمی راندمان اگزرژی سیکل به ۸۱/۶۸٪ رسید.

۵-۴ نتیجه گیری تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم تولید همزمان

- نتایج تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم نشان داد که توزیع ساعات خرابی دستگاه از توزیع وایبل تبعیت می کند.
- سیستم تا ساعت کاری ۳۷۱۰ به احتمال ۹۸٪ به طور کامل و بدون عیب و نقص عمل خواهد کرد و از سیستم اصلا انتظار خرابی نمی رود. این نکته را می توان از هر ساعت کاری مختلف متوجه شد.
- سیستم تا پایان ساعات کاری عمر، به احتمال ۱۴٪ به درستی عمل خواهد کرد.
- اولین خرابی از سیستم تولید همزمان را می توان از شروع ۱۲۱۹۴۹ ساعت از سیستم انتظار داشت.
- دومین خرابی از سیستم را می توان از ابتدای ساعات کاری ۲۱۳۴۵۲ از سیستم انتظار داشت. بدین معنی که سیستم تولید همزمان تا ساعت کاری ۲۱۳۴۵۲ حداقل ۲ بار خرابی را تجربه خواهد کرد.
- متوسط زمان تا اولین خرابی در سیستم تولید همزمان قبل از ۱۳۷۵۹۲ اتفاق خواهد افتاد

- قابلیت اطمینان سیستم تولید همزمان جهت اینکه بدون نقص کار کند به ترتیب از ۹۸٪ حدود ۱٪ کاهش میابد.

۵-۵ نتیجه گیری اقتصادی

- دوره بازگشت سرمایه در سیکل ۳/۵ سال محاسبه شد.
- اگر قرار است که جهت راه اندازی سیستم از وام بانکها استفاده شود، بهتر است بانکی انتخاب شود که بهره ساده را در سود خود لحاظ می کنند. بهره مرکب بسیار بازپرداخت بیشتری نسبت به سود ساده دارد.
- ارزش حال اسقاطی ۹۸۳۰۳/۶ دلار و ارزش آتی این پول در طی ۲۵ سال به ۳۳۲۸۹۰/۸۸۱۶ دلار می باشد.
- با افزایش مقدار NPV پروژه جذاب تر می شود. در این پژوهش مقدار NPV هنگامی که فقط نرخ تنزیل در نظر گرفته شود، بسیار کمتر از حالتی است که نرخ تنزیل و تورم در نظر گرفته می شود. با در نظر گرفتن نرخ تورم مقدار NPV از ۷۳۵۵۱۵۸۸۲/۸ به ۹۲۰۳۰۹۴۵۶/۲ افزایش پیدا کرد.

۵-۶ نتیجه گیری کلی

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که با افزایش دمای کاری پیل سوختی بازده انرژی و اگزرژی سیکل تولید همزمان قدرت، حرارت و سرما کاهش میابد. از سوی دیگر با افزایش فشار کاری پیل سوختی سیستم عملکرد بهتری از لحاظ انرژی خواهد داشت اما به دلیل طولانی شدن مباحث از بسط و اشاره آن خودداری شده است. نتایج اصلی حاکی از آن بود که سیستم در هنگامی که از چیلر تراکمی استفاده شود بازده انرژی و اگزرژی بیشتری خواهد داشت نسبت به حالتی که تنها از چیلر جذبی استفاده شود. از لحاظ اگزرژی سیستم چه در حالت استفاده از چیلر جذبی و چه در حالت استفاده از چیلر تراکمی و جذبی عملکرد بهتری دارد. با

استفاده از سیستم پیشنهادی بازگشت سرمایه ۳/۵ سال محاسبه شد. بهتر است در هنگام تحلیل اقتصادی نرخ‌های تورم و تنزیل برای سیستم‌ها در نظر گرفته شود. در این سیکل با در نظر گرفتن نرخ تورم، ارزش پول بیشتر از زمانی است که تنها نرخ تنزیل در نظر گرفته شود. همچنین پیل سوختی تا پایان عمر خود با توجه به نمودار (۴-۲۰)، حداقل ۲ بار خرابی را تجربه خواهد کرد.

۷-۵ پیشنهادات

پیشنهاد می‌شود که پژوهش حاضر در آینده برای مسائل زیر بهبود یابد

- با در نظر گرفتن یک ریفرمر داخلی برای پیل سوختی کربنات مذاب، چند نوع سوخت ورودی به پیل را جهت تحلیل انرژی و انرژی مورد بررسی قرار گیرد
- تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان چیلرهای جذبی و تراکمی در سیستم مذکور. جهت بررسی این مورد باید تعداد ساعات خرابی تک تک اجزا پیدا شود
- استفاده از گازهای مبرد مختلف جهت تحلیل انرژی و انرژی سیکل چیلر جذبی و تراکمی
- استفاده از سیکل زمین گرمایی به جای تولید حرارت و استفاده از توربین گاز جهت تولید قدرت
- با تغییر نوع چیلر جذبی تک اثره به سه اثره بازده انرژی و انرژی سیکل مورد بررسی قرار گیرد
- تحلیل زیست محیطی و کاهش آسیب به محیط
- مقایسه چند نوع پیل سوختی در سیستم‌های تولید همزمان

- [1] W. Huang, Y. Chang, and Y. Yuan, “Complementary Configuration and Optimal Energy Flow of CCHP-ORC Systems Using a Matrix Modeling Approach,” *Complexity*, vol. 2019, pp. 1–15, 2019.
- [2] “تانیرتک | تولید همزمان” [Online]. Available: <http://www.tanirtech.com/index.php/Fa/کارها/تولید-همزمان>. [Accessed: 10-May-2019].
- [3] “Combined Heat and Power (CHP) | ACEEE.” [Online]. Available: <https://aceee.org/topics/combined-heat-and-power-chp>. [Accessed: 13-May-2019].
- [4] “International Energy Agency.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/>. [Accessed: 10-May-2019].
- [5] M. Sheykhi, M. Chahartaghi, M. M. Balakheli, B. A. Kharkeshi, and S. M. Miri, “Energy, exergy, environmental, and economic modeling of combined cooling, heating and power system with Stirling engine and absorption chiller,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 180, pp. 183–195, Jan. 2019.
- [6] M. Chahartaghi and M. Sheykhi, “Energy, environmental and economic evaluations of a CCHP system driven by Stirling engine with helium and hydrogen as working gases,” *Energy*, vol. 174, pp. 1251–1266, May 2019.
- [7] S. B. Gupta, M. Biruduganti, B. Bihari, and R. Sekar, “Natural Gas Fired Reciprocating Engines for Power Generation: Concerns and Recent Advances,” no. x, 2012.
- [8] ب.ع.ز. خارکشی، “مدل سازی و بهبود عملکرد سیستم تولید همزمان گرمایش، سرمایش و برق با محرک اولیه پیل سوختی،” دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۴.

- [9] W. L. Holman, S. V. Pamboukian, M. Blood, J. A. Tallaj, D. C. McGiffin, and J. K. Kirklin, "Managing device infections: Are we progressing or is infection an insurmountable obstacle?," *ASAIO J.*, vol. 51, no. 4, pp. 452–455, 2005.
- [10] "کاربرد توربینهای گازی در صنعت نفت و گاز - شانا" [Online]. Available: <https://www.shana.ir/news/241145/کاربرد-توربینهای-گازی-در-صنعت-نفت-و-گاز>. [Accessed: 10-May-2019].
- [11] B. Praetorius and L. Schneider, "MICRO COGENERATION : TOWARDS A DECENTRALIZED AND SUSTAINABLE GERMAN ENERGY SYSTEM ? 1 Micro cogeneration technologies," *Fuel Cells*, no. June, pp. 7–10, 2006.
- [12] "What is a Gas Turbine | Knowledge Base | GE Power Generation." [Online]. Available: <https://www.ge.com/power/resources/knowledge-base/what-is-a-gas-turbine>. [Accessed: 13-May-2019].
- [13] I. Hernandez-Carrillo, C. Wood, and H. Liu, "Development of a 1000 W organic Rankine cycle micro-turbine-generator using polymeric structural materials and its performance test with compressed air," *Energy Convers. Manag.*, vol. 190, no. December 2018, pp. 105–120, 2019.
- [14] "پرتال جامع اطلاعات انرژی - میکرو توربین و انواع آن" [Online]. Available: <http://www.energyenergy.ir/index.php/fa/اطلاعات-انرژی/۱۸۷۴-میکرو-توربین-و-انواع-آن>. [Accessed: 11-May-2019].
- [15] "Capstone Turbine Corporation (CPST)." [Online]. Available: <https://www.capstoneturbine.com/>. [Accessed: 13-May-2019].
- [16] L. Goldstein, B. Hedman, D. Knowles, S. I. Freedman, R. Woods, and T. Schweizer, "Gas-Fired Distributed Energy Resource Technology Characterizations," 2003.

- [17] D. W. Wu and R. Z. Wang, “Combined cooling, heating and power: A review,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 32, no. 5–6, pp. 459–495, Sep. 2006.
- [18] A. J. and A. D. Larminie, *Oueslati_2002*. 2002.
- [19] L. Hu, “Molten Carbonate Fuel Cells for Electrolysis,” KTH royal institute of technology, 2016.
- [20] D. of E. S. D. of C. E. Lund University, *Stirling Engine Research*. .
- [21] A.-M. Borbely and J. F. Kreider, *Distributed generation: the power paradigm for the new millennium*. CRC press, 2001.
- [22] G. Abdollahi and M. Meratizaman, “Multi-objective approach in thermoenviromonic optimization of a small-scale distributed CCHP system with risk analysis,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 11, pp. 3144–3153, 2011.
- [23] K. E. Herold, R. Radermacher, and S. A. Klein, *Absorption chillers and heat pumps*. CRC press, 2016.
- [24] A. L. Pisello, A. Petrozzi, V. L. Castaldo, and F. Cotana, “On an innovative integrated technique for energy refurbishment of historical buildings: Thermal-energy, economic and environmental analysis of a case study,” *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 1313–1322, 2014.
- [25] E. Cardona, A. Piacentino, and F. Cardona, “Energy saving in airports by trigeneration. Part I: Assessing economic and technical potential,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 14–15, pp. 1427–1436, 2006.
- [26] E. Cardona, P. Sannino, A. Piacentino, and F. Cardona, “Energy saving in airports by trigeneration. Part II: Short and long term planning for the Malpensa 2000 CHCP plant,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 14–15, pp. 1437–1447, 2006.
- [27] H. Cho, P. J. Mago, R. Luck, and L. M. Chamra, “Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy

- consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 12, pp. 2540–2549, 2009.
- [28] J. Cao and F. Liu, “Simulation and optimization of the performance in the air-conditioning season of a BCHP system in China,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 185–192, 2008.
- [29] G. Chicco and P. Mancarella, “A unified model for energy and environmental performance assessment of natural gas-fueled poly-generation systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 8, pp. 2069–2077, 2008.
- [30] X. Q. Kong, R. Z. Wang, and X. H. Huang, “Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 9–10, pp. 1433–1442, 2004.
- [31] M. Chahartaghi and M. Sheykhi, “Thermal modeling of a trigeneration system based on beta-type Stirling engine for reductions of fuel consumption and pollutant emission,” *J. Clean. Prod.*, vol. 205, pp. 145–162, 2018.
- [32] M. H. Ahmadi, A. H. Mohammadi, and S. M. Pourkiaei, “Optimisation of the thermodynamic performance of the Stirling engine,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 149–161, Mar. 2016.
- [33] Z. Liu and I. A. Karimi, “New operating strategy for a combined cycle gas turbine power plant,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 171, pp. 1675–1684, 2018.
- [34] L. Daolin and Z. Shifei, “Tri-generation (electrical power, heated and chilled water) system and their application in shanghai,” *Am. Soc. Mech. Eng. Power Div. PWR*, vol. 34, no. 2, pp. 265–270, 1999.
- [35] M. Ebrahimi and M. Soleimanpour, “Design and evaluation of combined cooling, heating and power using micro gas turbine, adsorption chiller and

- a thermal damping tank in micro scale,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 127, pp. 1063–1076, 2017.
- [36] P. D. Fairchild, S. D. Labinov, A. Zaltash, and D. T. Rizy, “Experimental and theoretical study of microturbine-based BCHP system,” in *ASME Winter Annual Meeting, Nov, 2001*.
- [37] F. Caresana, G. Comodi, L. Pelagalli, M. Renzi, and S. Vagni, “Use of a test-bed to study the performance of micro gas turbines for cogeneration applications,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 16, pp. 3552–3558, 2011.
- [38] H. I. Henderson, B. Karambakkam, J. Boyer, and R. Staudt, “An hourly building simulation model aimed at fuel cell applications,” in *ASME 2006 4th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, 2006, pp. 741–750.
- [39] P. Seifert, “Rational supply of power, heat and cooling in buildings demonstrated in a hospital in Dresden,” *DBI Gasund Umwelttechnik GmbH, Final Tech. Report, Proj. No. BU/0065/97*, 2000.
- [40] Z. Yu, J. Han, and X. Cao, “Investigation on performance of an integrated solid oxide fuel cell and absorption chiller tri-generation system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 19, pp. 12561–12573, 2011.
- [41] M. Chahartaghi and B. A. Kharkeshi, “Performance analysis of a combined cooling, heating and power system with PEM fuel cell as a prime mover,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 128, pp. 805–817, 2018.
- [42] M. Mehrpooya, S. Sayyad, and M. J. Zonouz, “Energy, exergy and sensitivity analyses of a hybrid combined cooling, heating and power (CCHP) plant with molten carbonate fuel cell (MCFC) and Stirling engine,” *J. Clean. Prod.*, vol. 148, pp. 283–294, 2017.
- [43] M. H. Ahmadi, M. A. Jokar, T. Ming, M. Feidt, F. Pourfayaz, and F. R. Astarai, “Multi-objective performance optimization of irreversible molten

- carbonate fuel cell–Braysson heat engine and thermodynamic analysis with ecological objective approach,” *Energy*, vol. 144, pp. 707–722, Feb. 2018.
- [44] I. Samanta, R. K. Shah, and A. Ogut, “An Investigation of DIR-MCFC Based Cooling, Heating and Power System,” in *ASME 2003 1st International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, 2003, pp. 373–379.
- [45] T. A. Hamad *et al.*, “Study of a molten carbonate fuel cell combined heat, hydrogen and power system,” *Energy*, vol. 75, pp. 579–588, 2014.
- [46] M. Marefati, M. Mehrpooya, and M. B. Shafii, “A hybrid molten carbonate fuel cell and parabolic trough solar collector, combined heating and power plant with carbon dioxide capturing process,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 183, no. January, pp. 193–209, 2019.
- [47] B. Ghorbani, M. Mehrpooya, and S. A. Mousavi, “Hybrid molten carbonate fuel cell power plant and multiple-effect desalination system,” *J. Clean. Prod.*, vol. 220, pp. 1039–1051, 2019.
- [48] A. Buonomano, F. Calise, G. Ferruzzi, and A. Palombo, “Molten carbonate fuel cell: An experimental analysis of a 1kW system fed by landfill gas,” *Appl. Energy*, vol. 140, pp. 146–160, 2015.
- [49] H. Ansarinasab and M. Mehrpooya, “Investigation of a combined molten carbonate fuel cell, gas turbine and Stirling engine combined cooling heating and power (CCHP) process by exergy cost sensitivity analysis,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 165, no. January, pp. 291–303, 2018.
- [50] E. Antolini, “The stability of molten carbonate fuel cell electrodes: a review of recent improvements,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4274–4293, 2011.
- [51] R. Chacartegui, B. Monje, D. Sánchez, J. A. Becerra, and S. Campanari, “Molten carbonate fuel cell: Towards negative emissions in wastewater

- treatment CHP plants,” *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 19, pp. 453–461, 2013.
- [52] R. O’Hayre, S. Cha, W. Colella, and F. B. Prinz, “Fuel Cell Fundamentals. John Wiley&Sons,” *Inc., Hoboken, New Jersey*, pp. 235–250, 2006.
- [53] “Fuel Cell Heat Management.” [Online]. Available: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/fuel-cell-heat-transfer-management>. [Accessed: 24-May-2019].
- [54] R. E. Sonntag, C. Borgnakke, G. J. Van Wylen, and S. Van Wyk, *Fundamentals of thermodynamics*, 6th ed., vol. 6. Wiley New York, 1998.
- [55] “<http://www.exergoecology.com/excalc>.” .
- [56] E. G. Carmines and R. A. Zeller, *Reliability and validity assessment*, vol. 17. Sage publications, 1979.
- [57] D. Kumar, *Tutorials on Life Cycle Costing and Reliability Engineering*. 2008.
- [58] “چیلر - جزیی - Google Search.” [Online]. Available: https://www.google.com/search?q=چیلر+جزیی&client=firefox-b-d&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiYsp6iorfiAhUQGuwKHfNIBigQ_AUIDigB&biw=1366&bih=632#imgrc=7Xekk3y0jhm6SM: [Accessed: 25-May-2019].
- [59] A. A. V Ochoa, J. C. C. Dutra, J. R. G. Henríquez, and C. A. C. Dos Santos, “Dynamic study of a single effect absorption chiller using the pair LiBr/H₂O,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 108, pp. 30–42, 2016.
- [60] M. Chahartaghi and M. Sheykhi, “Energy and exergy analyses of beta-type Stirling engine at different working conditions,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 169, pp. 279–290, 2018.
- [61] R. C. Arora, *Refrigeration and air conditioning*, 2nd ed. Texas: PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.

- [62] Y. M. Kim and D. Favrat, "Energy and exergy analysis of a micro-compressed air energy storage and air cycle heating and cooling system," *Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 213–220, 2010.
- [63] Q. Hou, H. Zhao, and X. Yang, "Economic performance study of the integrated MR-SOFC-CCHP system," *Energy*, vol. 166, pp. 236–245, 2019.
- [64] J. Ahn, S. H. Park, S. Lee, Y. Noh, and D. Chang, "Molten carbonate fuel cell (MCFC)-based hybrid propulsion systems for a liquefied hydrogen tanker," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 15, pp. 7525–7537, Apr. 2018.
- [65] C. Somers, A. Mortazavi, Y. Hwang, R. Radermacher, P. Rodgers, and S. Al-hashimi, "Modeling water / lithium bromide absorption chillers in ASPEN Plus," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 4197–4205, 2011.
- [66] R. Ben Jemaa, R. Mansouri, I. Boukholda, A. Bellagi, and U. R. Thermique, "ScienceDirect Energy and exergy investigation of R1234ze as R134a replacement in vapor compression chillers," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–11, 2016.
- [67] "Molten carbonate fuel cell." [Online]. Available: <https://corrosion-doctors.org/FuelCell/mcfc.htm>. [Accessed: 02-Jul-2019].
- [68] J. Zhang, S. Cao, L. Yu, and Y. Zhou, "Comparison of combined cooling, heating and power (CCHP) systems with different cooling modes based on energetic, environmental and economic criteria," *Energy Convers. Manag.*, vol. 160, no. January, pp. 60–73, 2018.
- [69] S. E. Advisors, "Knowing the Cost of Steam," no. 31.

Abstract

In this study, a molten carbonate fuel cell (MCFC) is modeled. The MCFC produced 3055 Kw and 2454 Kw electricity and heat respectively. Due to the fact that in most systems, cool water is used for cooling, the above-mentioned fluid was used for cooling the fuel cell and the output water was fed into a single effect absorption chiller in order to produce cooling load. Modeling results showed that the efficiency of fuel cell and absorption chiller were 59.77% and 84%, respectively. Some of the output electricity was fed into an air-cooled chiller in order to produce cooling load. The performance coefficient of compression chiller was 3.611 and the energy efficiency of the cycle after using compression chiller was 79.88. Exergy efficiency of fuel cell, absorption chiller and compression chiller were calculated 49.77, 81.4 and 32.3 respectively. The exergy destruction of the mentioned components was 3112, 3.256 and 49.77, respectively also the exergy efficiency of the system was increased from 81.44 to 81.68 after compression chiller. By analyzing the risk and reliability of the cycle, the results show that the system will experience at least 2 failures until the end of its working life. Economic analysis of the system showed that the PB on the system is 3.5 years.

key words: Energy, Exergy, CCHP, Economic analysis, Risk analysis



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M. Sc. Thesis of Energy Systems Engineering

**Thermodynamic and Economic Analysis of Combined Cooling,
Heating and Power (CCHP) system based on a Molten Carbonate
Fuel Cell (MCFC)**

By: Seyyed Mahdi Miri

Supervisors:

Dr. Mahdmood Chahartaghi

Dr. Seyyed Majid Hashemian

September 2019