

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

تحلیل ترمودینامیکی و بهینه‌سازی فنی و اقتصادی سیستم‌های تولید

همزمان سرمایش، گرمایش و برق (CCHP) با محرک اولیه توربین بخار

نگارنده: رضا نامداریان

اساتید راهنما

دکتر محمود چهارطاقی

دکتر سید مجید هاشمیان

بهمن ۱۳۹۸

با احترام،

تقدیم بہ دستان زحمکش پروماد مہربان و فداکارم.

شکر و قدردانی

از خدای متعال پاس گزارم که توفیق کسب علم و دانش را به من عطا فرمود تا بتوانم این مرحله از علم آموزی را با موفقیت به پایان برسانم. از خانواده‌ی عزیزم به خاطر حمایت‌ها و

محبت‌های بی‌دریغی که نسبت به من داشته و دارند، کمال شکر و سپاس را دارم. از اساتید راهنمای بزرگوار، جناب آقای دکتر محمود چهارطاقی و دکتر سید مجید هاشمیان که کمک‌ها، راهنمایی‌ها و

تشویق‌هایشان موجب برطرف شدن مشکلات به وجود آمده در طی انجام این پروژه گردید، صمیمانه شکر و سپاسگزاری می‌کنم.

در انتها از تمامی اساتید محترم دانشکده‌ی مکانیک و دانشکاه صنعتی شاهرود که توفیق‌ناگردی‌شان را داشته‌ام، پاس گزارم، پاس گزارم، سلامتی و توفیق برای ایشان

مسألت دارم.

رضانامداریان

بهمن ۱۳۹۸

تعمیر نامه

این جانب رضا نامداریان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "تحلیل ترمودینامیکی و بهینه‌سازی فنی و اقتصادی سیستم‌های تولید همزمان سرمایش، گرمایش و برق (CCHP) با محرک اولیه توربین بخار" تحت راهنمایی دکتر چهارطاقی و دکتر هاشمیان متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب 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 پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) 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 پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

توربین بخار یک نوع از محرک اولیه هایی است که در سیستم تولید همزمان سه گانه کاربرد دارد. توربین بخار با استفاده از تبدیل انرژی بخار به انرژی مکانیکی قادر به تولید توان الکتریکی می باشد. که در این مطالعه به ارزیابی در صد کاهش آلاینده‌گی، ارزیابی اقتصادی و ارزیابی فنی که در چرخه یکپارچه سیکل رنکین با سوختن گاز طبیعی در بویلر برای تولید سرمایش، گرمایش و توان به‌عنوان سیستم سه‌گانه در نظر گرفته می‌شود، پرداخته می‌شود. این سیستم سه‌گانه شامل بویلر، توربین بخار، مبدل حرارتی، چیلر جذبی تک اثره و پمپ هست. موارد خاصی در این مطالعه یعنی، راندمان الکتریکی، راندمان همزمان الکتریکی و سرمایش، راندمان همزمان الکتریکی و گرمایش و راندمان سیستم سه‌گانه و همچنین راندمان انرژی در نظر گرفته شده است. پارامترهای عملکردی خروجی و زیست‌محیطی مختلفی مانند درصد کاهش هزینه های عملکردی، درصد کاهش مصرف سوخت، در صد کاهش آلاینده‌گی و بحث‌های اقتصادی و فنی تحت تأثیر درجه حرارت و فشارهای مختلف ورودی به توربین بخار بررسی می‌شود. همچنین عملکرد چیلر جذبی سیستم تولید همزمان سه‌گانه در شرایط عملکردی مختلف بررسی شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از سیستم سه‌گانه باعث افزایش، $23/75\%$ کاهش آلاینده‌گی کربن دی اکسید، کاهش $15/86\%$ مصرف سوخت و $33/14\%$ در هزینه‌های عملکردی در مقایسه با سیستم مجزا می‌شود. هنگامی که از یک سیستم سه‌گانه استفاده می‌شود پیشرفت قابل توجهی وجود دارد. به‌طوری‌که راندمان سیستم سه‌گانه به $82/64\%$ خواهد رسید. همچنین بهینه سازی هزینه های کل سالیانه با روش الگوریتم ژنتیک با متغیرهای تصمیم گیری دما و فشار ورودی به توربین بخار، راندمان ایزنتروپیک توربین بخار و راندمان مبدل حرارتی انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: تولید همزمان سه‌گانه، ارزیابی اقتصادی، ارزیابی فنی، مبدل حرارتی، چیلر جذبی

تک اثره، توربین بخار، کاهش انتشار کربن دی اکسید

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

-۱

-۲

-۳

فهرست مطالب

ز	فهرست جداول
س	فهرست اشکال
ض	فهرست علائم
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۶	۲-۱ بررسی سیستم‌های تولید همزمان
۶	۳-۱ مقدمه‌ای بر سیستم‌های تولید همزمان
۸	۴-۱ مقایسه سیستم‌های تولید همزمان با سیستم‌های تولید جداگانه انرژی
۹	۵-۱ مزایای سیستم‌های تولید همزمان
۱۱	۶-۱ تجهیزات و اجزاء سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه
۱۲	۱-۶-۱ محرک‌های اولیه
۱۳	۱-۶-۱-۱ موتورهای رفت و برگشتی
۱۵	۲-۶-۱-۲ توربین‌های گاز
۱۶	۳-۶-۱-۳ میکرو توربین
۱۷	۴-۶-۱-۴ توربین بخار
۱۹	۵-۶-۱-۵ پیل سوختی
۲۰	۶-۶-۱-۶ موتور استرلینگ
۲۴	۲-۶-۱ تجهیزات الکتریکی
۲۴	۳-۶-۱ دستگاه‌های بازیافت حرارت
۲۵	۴-۶-۱ چیلر جذبی
۲۶	۷-۱ جمع بندی
۲۷	فصل ۲: مروری بر کارهای گذشته

۲۸	۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده
۲۸	۱-۱-۲ تحقیقات پیشین با صرف نظر از نوع محرک اولیه
۳۰	۲-۱-۲ تحقیقات پیشین با توجه به نوع محرک اولیه
۳۰	۱-۲-۱-۲ موتور احتراق داخلی
۳۱	۲-۲-۱-۲ توربین گاز
۳۲	۳-۲-۱-۲ میکرو توربین
۳۲	۴-۲-۱-۲ پیل سوختی
۳۳	۵-۲-۱-۲ موتور استرلینگ
۳۳	۶-۲-۱-۲ توربین بخار
۳۷	۲-۲ بهینه سازی سیستم های تولید همزمان
۳۹	۱-۲-۲ بهینه سازی بر اساس توابع هدف ترمودینامیکی
۴۰	۳-۲ نتیجه گیری از کارهای گذشته
۴۰	۴-۲ معرفی کار حاضر
۴۳	فصل ۳: مدل سازی سیستم
۴۴	۱-۳ مقدمه
۴۴	۲-۳ طرح سیستم
۴۵	۳-۳ معادلات حاکم توربین بخار
۴۶	۴-۳ معادلات حاکم مبدل حرارتی
۴۷	۵-۳ معادلات حاکم بویلر
۴۷	۶-۳ چیلر جذبی تک اثره
۴۸	۱-۶-۳ تحلیل انرژی چیلر جذبی
۵۱	۷-۳ معادلات حاکم پمپ
۵۱	۸-۳ راندمان انرژی
۵۳	۹-۳ راندمان اگزرژی
۵۴	۱۰-۳ تحلیل انرژی، زیست محیطی و اقتصادی

۵۵.....	۳-۱۰-۱ درصد کاهش مصرف انرژی اولیه.....
۵۵.....	۳-۱۰-۲ درصد کاهش میزان آلاینده‌گی.....
۵۶.....	۳-۱۰-۳ درصد کاهش هزینه‌های عملکرد.....
۵۷.....	۳-۱۱ ارزش خالص هزینه‌های اولیه.....
۵۸.....	۳-۱۲ دوره بازگشت سرمایه.....
۵۸.....	۳-۱۲-۱ محاسبه بازگشت سرمایه به روش سنتی.....
۵۹.....	۳-۱۲-۲ محاسبه به روش کلاسیک.....
۵۹.....	۳-۱۳ روش بهینه سازی.....
۶۱.....	فصل ۴ : نتایج و بحث
۶۲.....	۴-۱ مقدمه.....
۶۲.....	۴-۲ اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی سیکل جذبی تک‌اثره.....
۶۳.....	۴-۳ اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی توربین بخار.....
۶۳.....	۴-۴ مدل‌سازی حرارتی سیستم.....
۶۶.....	۴-۵ بهینه سازی.....
۶۸.....	۴-۶ نتایج کلی.....
۸۵.....	فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۸۶.....	۵-۱ مقدمه.....
۸۶.....	۵-۲ نتیجه‌گیری.....
۸۸.....	۵-۳ پیشنهادها.....
۸۹.....	مراجع

فهرست جداول

- جدول (۱-۱) : عملکرد موتورهای رفت و برگشتی گازسوز با ظرفیت‌های مختلف [۹]..... ۱۴
- جدول (۲-۱) : عملکرد توربین گاز با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای تولید همزمان [۱۱]..... ۱۶
- جدول (۳-۱) : عملکرد چند نمونه میکرو توربین برای کاربردهای تولید همزمان [۱۲]..... ۱۷
- جدول (۴-۱) : عملکرد توربین بخار با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای تولید همزمان [۷]..... ۱۹
- جدول (۵-۱) : مشخصات عملکردی موتور استرلینگ ۵۵ کیلوواتی برای کاربردهای تولید همزمان [۱۰]..... ۲۲
- جدول (۶-۱) : مزایا، معایب و ظرفیت محرکه‌های اولیه [۶]..... ۲۲
- جدول (۷-۱) : مقایسه ویژگی محرک‌های اولیه [۱۶]..... ۲۳
- جدول (۱-۴) : اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی توربین بخار..... ۶۲
- جدول (۲-۴) : اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی توربین بخار..... ۶۳
- جدول (۳-۴) : شرایط عملکردی توربین بخار..... ۶۳
- جدول (۴-۴) : پارامترهای موردنیاز برای تحلیل انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی..... ۶۴
- جدول (۵-۴) : پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی..... ۶۴
- جدول (۶-۴) : نتایج ناشی از مدل‌سازی ترمودینامیکی چیلر جذبی و سیستم تولید همزمان..... ۶۵
- جدول (۷-۴) : نتایج مدل‌سازی سیستم تولید همزمان سه‌گانه..... ۶۵
- جدول (۸-۴) : هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری سیستم تولید همزمان سه‌گانه [۶۰]..... ۶۰
- و ۶۲ و ۶۶ و ۶۷ و ۶۸]..... ۶۶
- جدول (۹-۴) : نتایج بهینه‌سازی سیستم تولید همزمان..... ۶۷

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) : نمایی از یک سیستم تولید همزمان (CCHP) برای تأمین انرژی ساختمان [۶]..... ۵
- شکل (۲-۱) : نمایی از یک سیستم تولید جداگانه برای تأمین انرژی ساختمان [۶]..... ۶
- شکل (۳-۱) : نمایی از یک سیستم تولید همزمان سه گانه [۶]..... ۷
- شکل (۴-۱) : چند نمونه از محرک‌های اولیه سیستم‌های تولید همزمان [۶]..... ۱۳
- شکل (۵-۱) : موتور ژنراتور ۱۲ سیلندر گازسوز با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلووات [۸]..... ۱۴
- شکل (۶-۱) : توربین گاز با ظرفیت بسیار بالا ساخت شرکت زیمنس [۱۰]..... ۱۵
- شکل (۷-۱) : نمونه‌ای از یک میکرو توربین ۶۰ کیلوواتی [۱۲]..... ۱۷
- شکل (۸-۱) : توربین بخار [۷]..... ۱۹
- شکل (۹-۱) : پیل سوختی با ظرفیت ۵ کیلووات [۱۳]..... ۲۰
- شکل (۱۰-۱) : نحوه عملکرد موتور استرلینگ [۱۷]..... ۲۱
- شکل (۱۱-۱) : موتور استرلینگ با ظرفیت ۳۵ کیلوواتی [۱۰]..... ۲۲
- شکل (۱۲-۱) : نمونه یک مبدل حرارتی سیستم تولید همزمان [۱۰]..... ۲۴
- شکل (۱-۲) : سیستم تولید همزمان با محرک اولیه سیکل رنکین آلی [۴۳]..... ۳۴
- شکل (۱-۳) : طرح کلی سیستم تولید همزمان سه گانه پیشنهادی..... ۴۵
- شکل (۲-۳) : شماتیکی از توربین بخار..... ۴۵
- شکل (۳-۳) : شماتیکی از مبدل حرارتی..... ۴۶
- شکل (۴-۳) : نحوه عملکرد چیلر جذبی..... ۴۸
- شکل (۵-۳) : نحوه عملکرد چیلر جذبی تک اثره [۶]..... ۴۹
- شکل (۶-۳) : شماتیکی از پمپ..... ۵۱

- شکل (۷-۳) : سیستم تولید جداگانه انرژی برای مکان مورد نظر [۶] ۵۴
- شکل (۸-۳) فلوجارت الگوریتم ژنتیک ۶۰
- شکل (۱-۴) : تأثیر دمای ورودی به توربین بخار در فشار kPa ۳۳۰۰ بر توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی ۶۹
- شکل (۲-۴) : تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای $^{\circ}C$ ۳۰۰ بر توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی ۷۰
- شکل (۳-۴) : تأثیر دمای ورودی به توربین بخار در فشار kPa ۳۳۰۰ بر نسبت توان الکتریکی به ظرفیت سرمایشی و ظرفیت گرمایشی ۷۱
- شکل (۴-۴) : تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای $^{\circ}C$ ۳۰۰ بر نسبت توان الکتریکی به سرمایش و گرمایش ۷۲
- شکل (۵-۴) : تأثیر دمای ورودی به توربین بخار در فشار kPa ۳۳۰۰ بر راندمان ۷۳
- شکل (۶-۴) : شکل تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای $^{\circ}C$ ۳۰۰ بر راندمان ۷۴
- شکل (۷-۴) : تأثیر دمای ورودی توربین بخار در فشار kPa ۳۳۰۰ بر راندمان انرژی ۷۵
- شکل (۸-۴) : تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای $^{\circ}C$ ۳۰۰ بر راندمان انرژی ۷۶
- شکل (۹-۴) : تأثیر افزایش دمای ورودی به توربین بخار بر دبی مصرف سوخت ۷۷
- شکل (۱۰-۴) : تأثیر تغییرات فشار ورودی به توربین بخار در دمای $^{\circ}C$ ۳۰۰ بر دبی مصرفی سوخت ۷۸
- شکل (۱۱-۴) : تأثیر تغییرات فشار پایین چیلر جذبی بر توان سرمایشی ۷۸
- شکل (۱۲-۴) : تأثیر تغییرات فشار پایین چیلر جذبی بر ضریب عملکرد چیلر ۷۹
- شکل (۱۳-۴) : تأثیر راندمان مبدل حرارتی چیلر بر ضریب عملکرد چیلر جذبی ۸۰

شکل (۴-۱۴) : تأثیر دمای ورودی به توربین بخار در فشار 3300 kPa بر

۸۱ *TCO2ER, CR, TPES*

شکل (۴-۱۵) : تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300°C بر *TCO2ER, CR, TPES*.. ۸۱

شکل (۴-۱۶) : تأثیر تغییرات دمای ورودی توربین بخار در فشار 3300 kPa بر بازگشت سرمایه

۸۲

شکل (۴-۱۷) : تأثیر تغییرات فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300°C بر بازگشت سرمایه. ۸۳

فهرست علائم

CCHP	سیستم تولید همزمان سرمایش، گرمایش و برق
CHP	سیستم تولید همزمان گرمایش و برق
\dot{m}	دبی سیال
NC	ظرفیت هر یک از اجزا
LHV	ارزش حرارتی پایین
NPV	ارزش خالص فعلی
NPWB	سود خالص فعلی
NPWC	ارزش خالص فعلی هزینه سرمایه‌گذاری
PB	دوره بازگشت سرمایه
\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت
SV	هزینه اسقاط
T	دما
\dot{W}	توان

$Cost^{CCHP}$	هزینه سوخت برای سیستم تولید همزمان
$Cost^{SP}$	هزینه سوخت برای سیستم مجزا
$Cost_F$	هزینه خرید گاز طبیعی
$Cost_w$	هزینه خرید برق
CR	در صد کاهش هزینه‌ها
F_{CCHP}	انرژی سیستم تولید همزمان
F_{SP}	انرژی سیستم مجزا
TPES	صرفه جویی در انرژی اولیه
TCO_2ER	در صد کاهش انتشار آلاینده‌گی دی اکسید کربن
COP	ضریب عملکرد
Cog	تولید همزمان
	زیر نویس
S	بخار
F	سوخت
St	توربین بخار
ev	اوپراتور

y

سال

el

الکتریکی

he

مبدل حرارتی

ex

اگزرژی

tri

تولید همزمان سه گانه

sp

تولید جداگانه

h

گرما

cog

تولید همزمان

حروف یونانی

η

راندمان

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه

امروزه با توجه به این که میزان مصرف انرژی در سطح جهان بسیار بالا است و سوخت‌های فسیلی یکی از پرکاربردترین منابع انرژی به شمار می‌روند و آلودگی هوا، انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن کره زمین از مضرات و معایب این سوخت‌ها می‌باشد و از طرفی نیز این منابع تجدید ناپذیر بوده و در حال اتمام هستند، پس باید به نوعی استفاده از آن‌ها را کاهش داد، که یکی از مهم‌ترین راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی، باهدف افزایش بازده تولید انرژی، استفاده از سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه^۱ (تولید همزمان سرمایش، گرمایش و برق^۲) در محل مصرف هست. این سیستم‌ها راه‌حلی شناخته‌شده برای حل مشکلات قرن حاضر نظیر کاهش راندمان، افزایش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و همچنین افزایش هزینه‌های عملکرد سیستم‌های مرسوم تولید جداگانه انرژی^۳ است. سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه، سیستم‌هایی هستند که به کمک یک محرک اولیه، به تولید انرژی الکتریکی موردنیاز مصرف‌کننده در نزدیکی محل مصرف می‌پردازند در نتیجه تلفات موجود در انتقال و توزیع برق را کاهش می‌دهند و از قسمتی از گرمای اتلافی سیستم، برای ایجاد گرمایش، از قسمتی دیگر از گرمای اتلافی، یا انرژی الکتریکی برای تبرید استفاده می‌کنند و این کار باعث بالا رفتن راندمان این‌گونه از سیستم‌ها شده است.

سیستم‌های تولید همزمان قابلیت استفاده برای کاربردهای مختلف را دارند. که برای نمونه می‌توان به استفاده از این سیستم‌ها در هتل‌ها، بیمارستان‌ها، شهرک‌ها و کارخانه‌ها اشاره کرد. سیستم‌های تولید

^۱ *Trigeneration*

^۲ *Combined cooling, heating and power (CCHP)*

^۳ *Separated Energy Production*

همزمان با محرک اولیه‌های مختلفی مانند توربین گاز^۱، موتورهای احتراق داخلی^۲، توربین بخاری^۳، میکرو توربین^۴، پیل سوختی^۵ و موتور استرلینگ^۶ راه اندازی می‌شوند.

که با توجه به این که محرک‌های اولیه دارای کاربرد، راندمان و میزان آلاینده‌گی متفاوتی هستند. محرک اولیه مناسب را برای سیستم تولید همزمان به کار می‌گیرند و با توجه به نوع محرک اولیه انتخابی می‌توان سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی مختلفی را برای استفاده از انرژی اتلافی آن‌ها استفاده نمود.

در سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه به دلیل این که از حرارت اتلافی برای سرمایش و گرمایش استفاده می‌شود. باعث کاهش مصرف سوخت و کاهش تولید آلاینده‌ها و افزایش راندمان سیستم تولید همزمان سه‌گانه می‌شود. با توجه به این که سیستم تولید همزمان سه‌گانه در نزدیکی مصرف کننده احداث می‌شود. تلفات انتقال برق را تا حد زیادی کاهش خواهند داد. یکی دیگر از مزایای این سیستم‌ها این است که به‌طور پراکنده ولی با قدرت‌های پایین نسبت به نیروگاه‌های تولید برق سنتی در سطح کشورها وجود دارند، در نتیجه از لحاظ پدافند غیرعامل و متمرکز نبودن قدرت در یک مساحت محدود حائز اهمیت هستند. از سوی دیگر این سیستم‌ها دارای قابلیت اطمینان بالایی هستند زیرا واحدهای تولیدی این سیستم‌ها دارای قدرت کمی نسبت به نیروگاه‌های متمرکز قوی هستند و در صورت خرابی یک واحد تولیدی تعداد محدودی از مصرف‌کننده‌ها از داشتن برق محروم می‌گردند. ولی در نیروگاه‌های بزرگ ممکن است برق یک شهر و یا محدوده وسیعی قطع گردد. سیستم‌های تولید همزمان برخلاف

^۱ Gas Turbines

^۲ Internal combustion engines

^۳ Steam Turbine

^۴ MicroTurbine

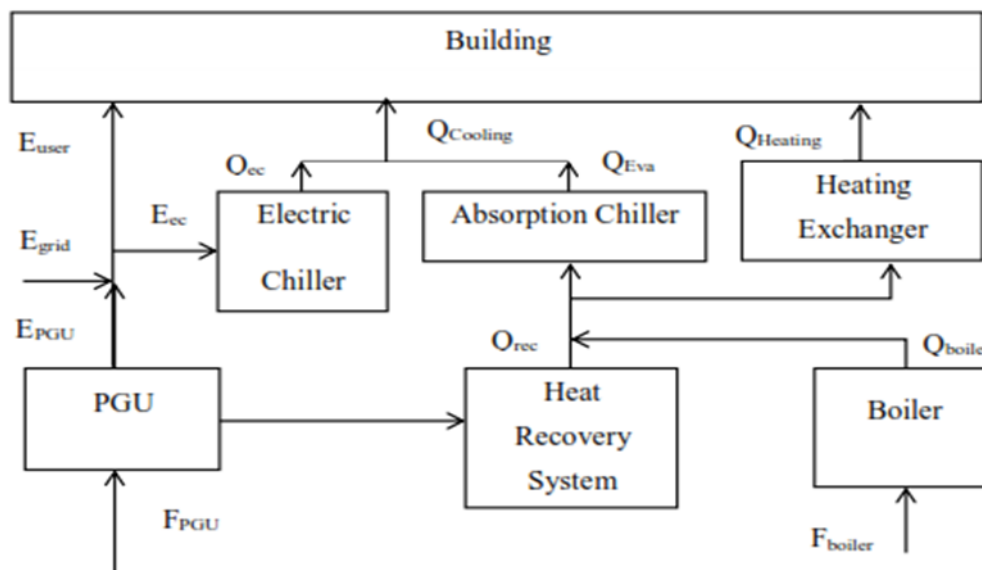
^۵ Fuel Cell

^۶ Stirling engine

نیروگاه‌های سنتی که دارای راندمان نسبتاً پایینی هستند، می‌توانند به راندمان کل حدود ۶۰٪ تا ۹۰٪ برسند [۱-۲].

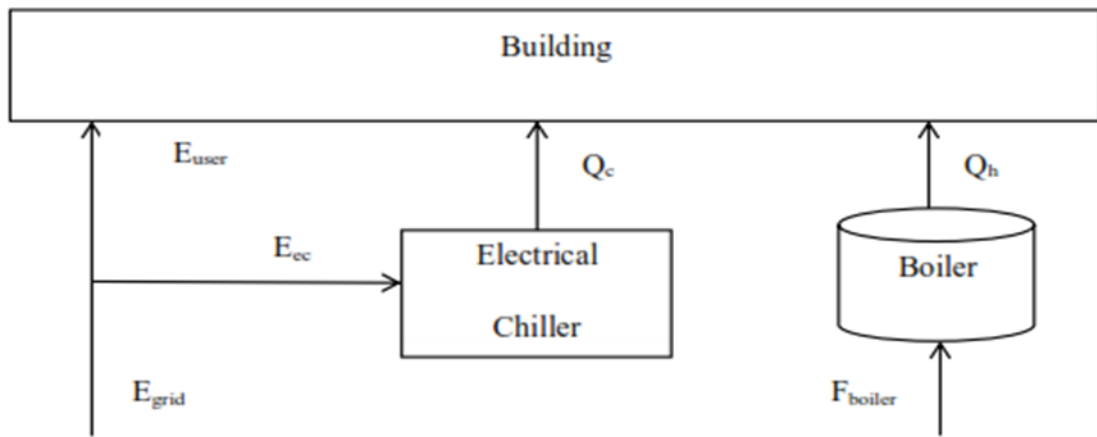
در شکل (۱-۱) نیز نمونه‌ای از یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه مرسوم نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱-۱) مشخص است F_{pgu} و F_{boiler} به ترتیب حاصل ضرب ارزش حرارتی سوخت مورد استفاده، در دبی سوخت واحد تولید قدرت^۱ و بویلر را نشان می‌دهد که بیانگر انرژی ورودی به سیستم تولید همزمان سه‌گانه هست. پس از ورود انرژی به سیستم در PGU کار تولید می‌شود و غالباً درصد نسبتاً زیادی از انرژی ورودی به سیستم تولید همزمان در PGU به صورت حرارت تلف می‌شود و لذا برای استفاده از این حرارت، این انرژی اتلافی به سیستم بازیافت حرارت داده می‌شود و از طرفی با توجه به نیاز مصرف‌کننده اگر انرژی حرارتی مورد نیاز تأمین شده توسط واحد تولید قدرت پاسخگوی مصرف‌کننده نباشد بویلر در مدار آمده و این کمبود انرژی را جبران می‌کند. انرژی حرارتی بازیافت شده در سیستم بازیافت حرارت نیز به صورت حرارت به چیلر جذبی داده می‌شود اما اگر نیاز به سرمایش مصرف‌کننده بیش از اندازه تولید شده توسط چیلر جذبی باشد، چیلر الکتریکی نیز وارد مدار می‌شود و این کمبود انرژی را جبران می‌کند. از طرف دیگر نیز اگر مصرف انرژی الکتریکی ساختمان بیش از تولید انرژی الکتریکی توسط واحد تولیدکننده قدرت باشد از شبکه برق خریداری می‌شود و اگر مصرف کمتر از تولید باشد هم برق تولیدی توسط واحد تولیدکننده قدرت نیز به شبکه فروخته می‌شود. در نهایت نیز انرژی حرارتی مورد نیاز مصرف‌کننده نیز از انرژی اتلافی توسط PGU تأمین می‌شود ولی مشابه انرژی الکتریکی و سرمایشی، اگر تولید کمتر از مصرف باشد، بویلر وارد مدار می‌شود.

^۱ Power Generation Unit (PGU)



شکل (۱-۱): نمایی از یک سیستم تولید همزمان (CCHP) برای تأمین انرژی ساختمان [۶]

در شکل (۲-۱) نیز طرح یک سیستم تولید جداگانه (سنتی) مرسوم برای رفع نیاز انرژی الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۲-۱) مشخص است. در سیستم‌های تولید جداگانه، انرژی الکتریکی توسط نیروگاه‌های تولید برق تأمین‌شده، انرژی حرارتی و انرژی سرمایشی موردنیاز ساختمان نیز توسط بویلر و برق شبکه تأمین می‌گردد. همان‌طور که از مقایسه‌ی این دو شکل قابل‌مشاهده است. تولید همزمان برق، حرارت و سرما دارای مزایایی در مقایسه با سیستم‌های تولید جداگانه هستند که از آن جمله می‌توان به نزدیکی محل تولید برق به مصرف‌کننده که کاهش تلفات ناشی از انتقال را در پی دارد، مسئله پدافند غیرعامل که واحدهای تولید انرژی در سطح کشور پراکنده‌اند و بازیابی انرژی اتلافی از محرک اولیه و راندمان بالای این سیستم‌ها اشاره کرد.



شکل (۱-۲): نمایی از یک سیستم تولید جداگانه برای تأمین انرژی ساختمان [۶]

۱-۲ بررسی سیستم‌های تولید همزمان

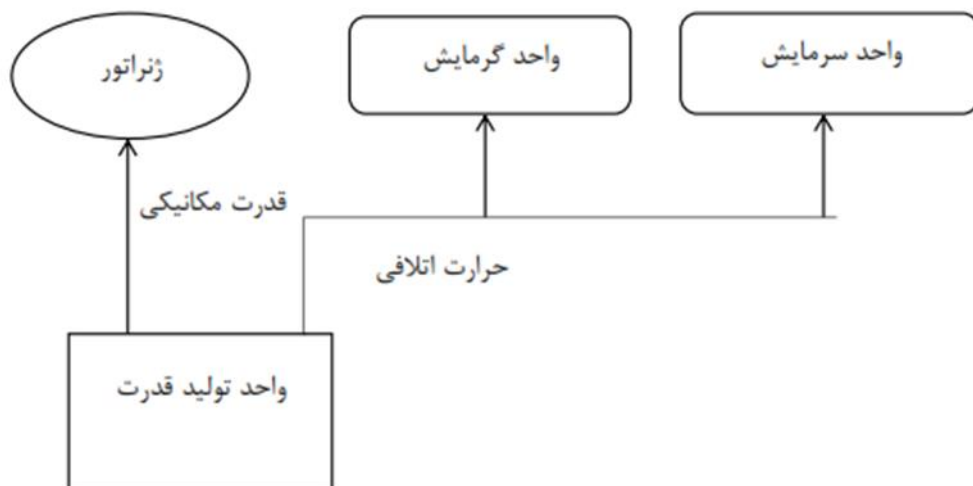
سیستم‌های تولید همزمان شکلی از تولید انرژی غیره متمرکز و در حقیقت تولید متوالی چند صورت مفید انرژی از یک منبع تولید انرژی است. نحوه عملکرد در سیستم‌های تولید همزمان هم به این صورت خواهد بود که معمولاً انرژی شیمیایی سوخت به انرژی مکانیکی و حرارتی تبدیل می‌شود. که از انرژی مکانیکی برای تولید برق و از انرژی حرارتی برای تولید سرمایش و گرمایش در سیستم‌های تولید همزمان استفاده می‌شود.

۱-۳ مقدمه‌ای بر سیستم‌های تولید همزمان

در سال‌های اخیر سیستم‌های تولید همزمان بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته و تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. که مزایا و قابلیت کاربردهای مختلف در سیستم‌های تولید همزمان باعث افزایش استفاده جامعه بشری از سیستم‌های تولید همزمان شده است. بیش از ۱۱٪ از انرژی برق تولیدی در کشورهای گروه ۸ (G8)^۱ و همچنین کشورهای برزیل، چین، هند، مکزیک و آفریقا جنوبی در سال ۲۰۰۸ از طریق سیستم‌های تولید همزمان تولید شده است. انتظار می‌رود این مقدار در سال

^۱ Group8

۲۰۱۵ به ۱۵٪ و در سال ۲۰۳۰ به ۲۴٪ برسد؛ به عبارت دیگر انتظار می‌رود میزان برق تولیدی توسط سیستم‌های تولید همزمان تا سال ۲۰۱۵ به ۴۳۰GW و تا سال ۲۰۳۰ به ۸۳۰ GW برسد [۳]. سیستم‌های تولید همزمان قابلیت استفاده برای کاربردهای مختلف از قبیل صنایع غذایی، فرودگاه‌ها، مراکز خرید، هتل‌ها، بیمارستان‌ها و مجتمع مسکونی را دارد. شکل (۳-۱) سیستم تولید همزمان سه‌گانه را نشان می‌دهد:



شکل (۳-۱): نمایی از یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه [۶]

سیستم‌های تولید همزمان سرمایش، گرمایش و برق از سه جزء مهم تشکیل شده‌اند. که در زیر به آن‌ها اشاره شده است.

- واحد تولید قدرت که به‌عنوان محرک اولیه سیستم شناخته می‌شود. مانند توربین بخار^۱
- واحد سرمایش، مانند چیلر جذبی
- واحد گرمایش، مانند کوئل حرارتی

نحوه انجام فرایندها در سیستم‌های تولید همزمان به شرح ذیل می‌باشد.

^۱ Steam Turbine

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

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

در مولدهای قدرت امروزی، معمولاً از سوزاندن سوخت‌های فسیلی و گرمای حاصله برای تولید قدرت محوری و سپس تبدیل آن به انرژی الکتریسیته استفاده می‌شود. متداول‌ترین این نوع سیستم‌ها، نیروگاه‌های عظیم برق هستند. در نیروگاه‌های حرارتی که سهم عمده‌ای در تأمین نیاز الکتریسیته جوامع مختلف دارند، به‌طور متوسط تنها یک‌سوم از انرژی سوخت ورودی، به انرژی مفید الکتریسیته تبدیل می‌شود، به عبارت دیگر بازده این نیروگاه‌ها حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد است. در این نوع نیروگاه‌ها، مقدار زیادی انرژی حرارتی از طرق مختلف نظیر کندانسور، دیگ بخار، برج خنک‌کن، پمپ‌ها و سیستم لوله‌کشی موجود در تأسیسات، به هدر می‌رود. از این گذشته، در شبکه‌های انتقال برق نیز حدود ۱۵ درصد از انرژی الکتریسیته تولیدی، تلف می‌شود. اگر تولید برق در محل مصرف صورت بگیرد، این مقدار اتلاف عملاً وجود نخواهد داشت. استفاده هرچه بیشتر از گرمای آزاد شده در حین فرایند سوختن سوخت، باعث افزایش بازده انرژی و کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش هزینه‌های مربوط به تأمین انرژی اولیه می‌شود. تولید همزمان برق، گرما و سرما، می‌تواند علاوه بر افزایش بازده و کاهش

مصرف سوخت، باعث کاهش انتشار گازهای آلاینده شود. به این ترتیب سیستم تولید همزمان قادر به بهره‌برداری بیشتر از انرژی حرارتی سوخت ورودی به سیستم است [۴].

۱-۵ مزایای سیستم‌های تولید همزمان

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

• افزایش راندمان نیروگاه و کاهش مصرف سوخت

استفاده از سیستم تولید همزمان باعث افزایش راندمان کلی نیروگاه می‌شود. بازده کلی نیروگاه‌های معمولی^۱ که با سوخت فسیلی و یک محرک اولیه کار می‌کنند کمتر از ۴۰٪ است. این بدان معنی است که بیش از ۶۰٪ از ارزش حرارتی سوخت ورودی نیروگاه، هدر می‌رود. در سیستم‌های تولید همزمان با استفاده از حرارت اتلافی در قسمت تولید قدرت، نیازهای گرمایشی و سرمایشی را بدون استفاده از سوخت اضافی برطرف می‌کنند. همچنین راندمان کلی سیستم‌های تولید همزمان حدود ۶۰٪ تا ۹۰٪ هست. در نتیجه این سیستم‌ها، تلفات انرژی کمتری نسبت به سیستم‌های مرسوم تولید جداگانه انرژی دارند [۱-۳].

• کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

استفاده از سیستم تولید همزمان باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG)^۲ می‌شود همان‌طور که بیان شد سیستم تولید همزمان نسبت به یک نیروگاه معمولی از سوخت کمتری

^۱ Conventional Power Plants

^۲ Green House Gas

استفاده می‌کند. در نتیجه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط این سیستمها در مقایسه با سیستم‌های تولید جداگانه کمتر خواهد بود. انتظار می‌رود در سال ۲۰۱۵ به خاطر استفاده از سیستم‌های تولید همزمان 170 MT / year گاز CO_2 کمتری تولید شود و در سال ۲۰۳۰ این مقدار به عدد 950 MT / year برسد [۵].

• کوتاه‌تر شدن خطوط انتقال انرژی

از آنجایی که سیستم‌های تولید همزمان در نزدیکی مصرف‌کننده ساخته می‌شوند، لذا نیاز به خطوط انتقال برق کمتری دارند که باعث کاهش هزینه و همچنین کاهش تلفات خطوط انتقال انرژی می‌شود. تولید مرسوم برق به این صورت که نیروگاه‌های بزرگ و متمرکز در چند نقطه، برق همه مصرف‌کنندگان را تأمین نمایند، بدان معنی است که فاصله بین مصرف‌کننده نهایی با نیروگاه برق زیاد است و باید از خطوط انتقال برق بسیار زیادی استفاده شود. احداث خطوط برق طولانی بسیار پرهزینه است و از طرف دیگر این خطوط طولانی باعث اتلاف انرژی زیادی می‌شوند. تلفات ناشی از انتقال و توزیع برق از نیروگاه‌های متمرکز به مصرف‌کننده نهایی به میزان ۹٪ است. در مقابل تلفات ناشی از انتقال و توزیع برق توسط سیستم‌های تولید همزمان به مراتب کمتر از نیروگاه‌های متمرکز خواهد بود [۶].

• استفاده بهتر از منابع انرژی

با توجه به این که سیستم‌های تولید همزمان در نزدیکی مصرف‌کننده ساخته می‌شود، می‌توانیم انرژی مورد نیاز را به راحتی تخمین زده و به میزان مورد نیاز انرژی تولید کنیم. بنابراین انرژی به میزان مورد نیاز تولید می‌شود [۵].

• افزایش قابلیت اطمینان

سیستم‌های تولید همزمان قابلیت اطمینان بالایی دارند. به‌عنوان مثال خاموشی که در سال ۲۰۰۳ در قسمت شمال شرقی کشور آمریکا رخ داد باعث ضرر چند میلیارد دلاری شد. بسیاری از بیمارستان‌ها در نیویورک به خاطر این کمبود برق آسیب دیدند. در سال ۱۹۹۸ حادثه‌ای دیگری در کشورهای کانادا و آمریکا رخ داد خطوط انتقال برق و مراکز توزیع برق به خاطر طوفان آسیب دید. در این طوفان بیش از ۳۰۰۰۰ مرکز توزیع برق و همه ۱۰ دکل انتقال برق ولتاژ بالا آسیب دیدند. پر اثر این طوفان بیش از ۵ میلیون نفر از مردم برق خود را از دست دادند. نیروگاه‌های غیرمتمرکز با همان سیستم‌های تولید همزمان دارای قابلیت اطمینان بالایی می‌باشند چراکه به خاطر خطوط انتقال برق کم و مراکز توزیع ناچیز احتمال خرابی شبکه بسیار پایین می‌آید [۶].

مزایای ذکرشده باعث ترغیب محققان و مهندسان کشور های مختلف برای توسعه هر چه بیشتر سیستم‌های تولید همزمان و جایگزینی این سیستم ها به جای سیستم های سنتی با راندمان انرژی پایین شده است

۱-۶ تجهیزات و اجزاء سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه

یک واحد سیستم تولید همزمان سه‌گانه شامل اجزا و تجهیزات مختلفی به شرح ذیل است که نوع این تجهیزات تاثیر بسزایی در نحوه کارکرد و ظرفیت سیستم دارد. محرکهای اولیه، تجهیزات بازیافت حرارت، تجهیزات الکتریکی و تجهیزات کنترلی مهمترین قسمتهای یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه را تشکیل میدهد. که در ادامه به توضیح هر یک از این تجهیزات می‌پردازیم.

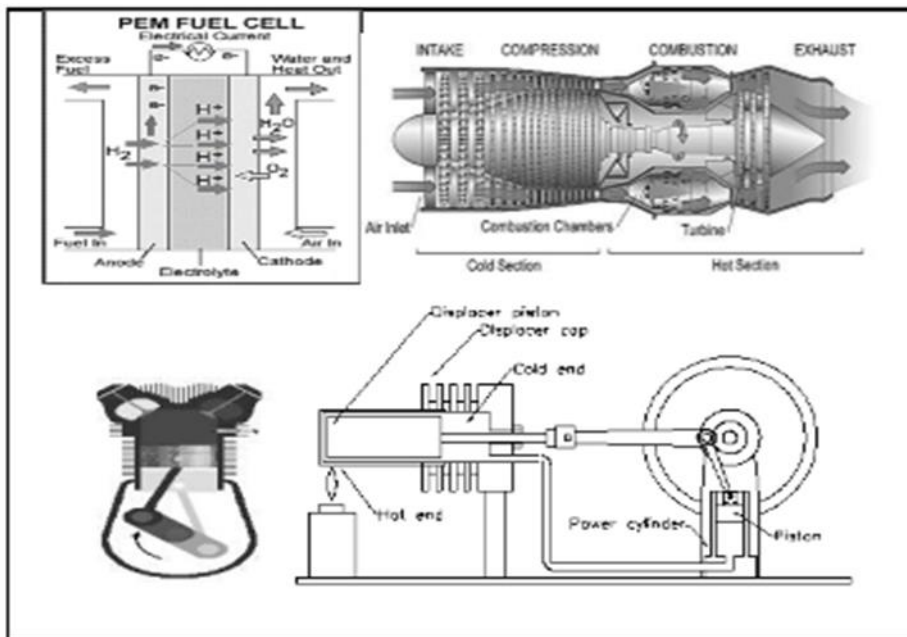
۱-۶-۱ محرک‌های اولیه

محرک اولیه یکی از مهم‌ترین جزء سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه می‌باشد. که در واقع واحد تولید قدرت در سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه به عنوان محرک اولیه شناخته می‌شود. بنابراین یکی از دغدغه‌های عمده مهندسان و محققان انتخاب یک محرک اولیه مناسب با توجه به شرایط عملکردی است. از انواع محرک‌های اولیه، موتورهای رفت و برگشتی، توربین‌های گاز، میکروتوربین‌ها، توربین‌های بخار، پیل‌های سوختی و موتورهای استرلینگ را می‌توان نام برد. در شکل (۱-۴) چند نمونه از محرک‌های اولیه نشان داده شده است.

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

- تقاضا بار الکتریکی با توجه به راندمان، قدرت و امکان استفاده از چند محرک اولیه محاسبه شود.
- نیازهای گرمایشی و سرمایشی برای مصرف‌کننده محاسبه شود و بر این اساس، نسبت قدرت به گرمایش و سرمایش برای نیروگاه مطلوب محاسبه شود.
- توانایی محرک اولیه برای عمل کردن با بیش از یک نوع سوخت به انعطاف‌پذیری محرک اولیه می‌افزاید. از طرف دیگر نوع سوخت بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیرگذار است برای مثال، انتشار گازهای گلخانه‌ای از احتراق گاز طبیعی کمتر از احتراق دیزل است.
- انتخاب مکان سیستم تولید همزمان دارای محدودیت‌هایی از قبیل میزان آلودگی صوتی و میزان انتشار گاز گلخانه‌ای در محل مصرف است. همچنین ابعاد نیروگاه برای انتخاب مکان نیروگاه اهمیت دارد. بنابراین باید میزان آلودگی صوتی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان ظرفیت محرک اولیه به‌وضوح تعریف شده باشد.
- در برخی مواقع ضروری از محرک اولیه به عنوان یک سیستم پشتیبانی می‌توان استفاده کرد. که در این صورت باید زمان راه اندازی در نظر گرفته شود.

نوع سوخت در هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری تأثیرگذار است. نوع سوخت ممکن است بر طول عمر پوشش داخلی محرک اولیه تأثیرگذار باشد، در نتیجه تعمیر و نگهداری بیشتری نیاز شود. در ادامه چند نوع از محرک‌های اولیه معرفی می‌شوند.



شکل (۱-۴): چند نمونه از محرک‌های اولیه سیستم‌های تولید همزمان [۶]

۱-۱-۶-۱ موتورهای رفت و برگشتی

موتورهای رفت و برگشتی یا موتورهای احتراق داخلی به موتورهایی گفته می‌شود که در آن‌ها مخلوط سوخت و اکسیدکننده (معمولاً هوا یا اکسیژن) در داخل محفظه بسته‌ای به نام محفظه احتراق واکنش داده و محترق می‌شوند. که در آن‌ها انرژی شیمیایی سوخت در داخل محفظه سیلندر پس از احتراق به انرژی مکانیکی و انرژی گرمایی تبدیل می‌گردد. این گونه موتورها برای کاربردهای مختلفی از جمله خودروهای سبک، کامیون‌های ماشین‌آلات ساختمانی، تجهیزات معدن، ماشین‌آلات کشاورزی، کشتی‌ها، ناوگان‌های ریلی و نیز گستره متنوعی از تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. ظرفیت‌های رایج برای تولید همزمان برق و گرما برای این موتورها معمولاً تا بیش از ۵ مگاوات است. موتورهای رفت و برگشتی مورد استفاده برای تولید همزمان از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار هستند [۷].

در شکل (۵-۱) موتور ژنراتور ۱۲ سیلندر گازسوز با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلووات نشان داده شده است. البته موتورهای احتراق داخلی، معایبی از قبیل محدودیت در راندمان حرارتی، امکان استفاده تنها از بعضی سوخت‌های فسیلی و تولید آلاینده‌گی نسبتاً زیاد خواهند داشت [۸].



شکل (۵-۱): موتور ژنراتور ۱۲ سیلندر گازسوز با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلووات [۸]

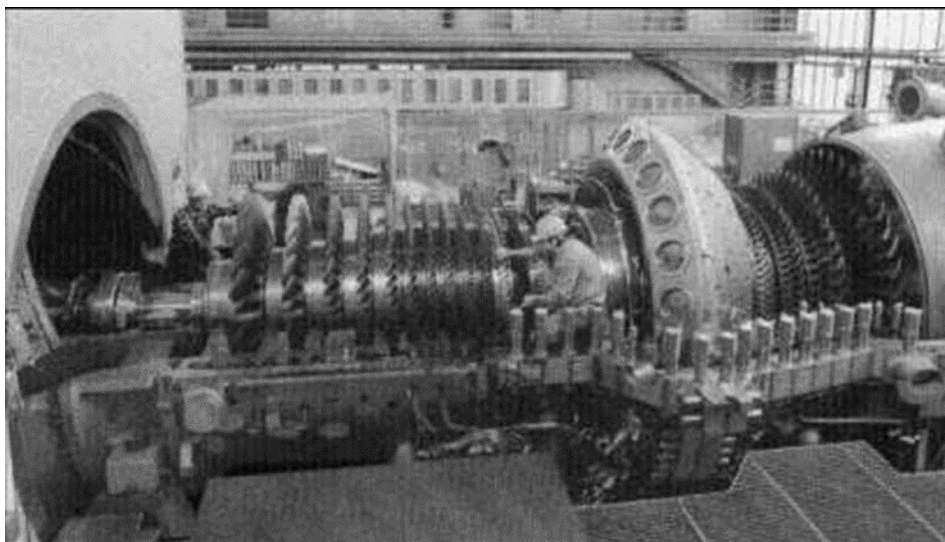
در جدول (۱-۱) عملکرد موتورهای رفت و برگشتی گازسوز با ظرفیت‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول (۱-۱): عملکرد موتورهای رفت و برگشتی گازسوز با ظرفیت‌های مختلف [۹]

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

۱-۶-۱-۲ توربین‌های گاز

توربین‌های گاز از اواخر دهه ۱۹۳۰ میلادی به منظور تولید برق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این محرکه‌ها از ویژگی‌هایی چون سبک‌وزنی، سادگی، تنوع و قابلیت اطمینان بسیار بالا برخوردار می‌باشند. بهره‌برداری از این نوع فناوری و نیز نصب و راه‌اندازی آن از سادگی و مطلوبیت خوبی برخوردار است. در حال حاضر توربین‌های گاز با ظرفیت‌هایی در محدوده ۵۰۰ کیلووات تا ۲۵۰ مگاوات در دسترس می‌باشند. این نوع محرکه‌ها را می‌توان فقط برای تولید برق و یا تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش مورد استفاده قرار داد. امروزه توربین‌های گاز که فقط برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند با بازدهی تا محدوده ۴۰٪ به صورت تجاری در دسترس می‌باشند. به‌طور کلی، گازهای احتراق خارج شونده از توربین‌های گاز کیفیت حرارتی بالایی داشته و قابلیت استفاده در سیستم‌های تولید همزمان را دارا می‌باشند. با بهره‌گیری از حرارت بازیافت شده از گازهای خروجی امکان دستیابی به بازدهی کلی سیستم در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد میسر می‌گردد [۱۰]. در شکل (۱-۶) توربین گاز با ظرفیت بسیار بالا ساخت شرکت زیمنس^۱ نشان داده شده است.



شکل (۱-۶) : توربین گاز با ظرفیت بسیار بالا ساخت شرکت زیمنس [۱۰]

^۱ Siemens

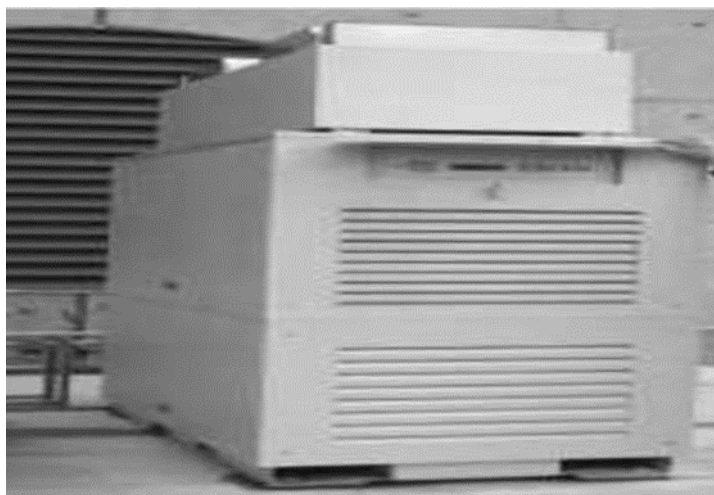
در جدول (۲-۱) عملکرد توربین گاز با ظرفیت‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول (۲-۱): عملکرد توربین گاز با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای تولید همزمان [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 کلی	%	۶۶/۳	۶۹/۸	۶۸/۴	۷۰/۷	۷۲/۱

۳-۱-۶-۱ میکرو توربین

میکرو توربین، تکنولوژی توربین گازی توسعه یافته در مقیاس کوچک تر است. این فناوری اساساً برای کاربرد در بخش حمل و نقل توسعه یافت اما امروزه به عنوان روشی برای تولید برق در نظر گرفته شده است. این محرکه‌ها که از سوخت‌های گازی و مایع استفاده می‌نمایند دارای سرعت دورانی بسیار زیادی می‌باشند. میکرو توربین‌ها در حدود سال ۱۹۹۷ میلادی به صورت آزمایشی مورد بهره‌برداری قرار گرفته و از سال ۲۰۰۰ میلادی به صورت تجاری وارد بازار شدند. محدوده ظرفیت‌های در دسترس و یا در حال توسعه میکرو توربین‌ها از ۳۰ تا ۲۵۰ کیلووات است. در حالی که ظرفیت توربین گازها معمولاً از ۵۰۰ کیلووات تا ۲۵۰ مگاوات است. مشابه توربین گازهای بزرگ، میکرو توربین‌ها را می‌توان در حالت فقط تولید برق و یا در سیستم‌های تولید همزمان مورد استفاده قرار داد. این توربین‌ها می‌توانند از سوخت‌های متنوعی از جمله گاز طبیعی و سوخت‌های مایع مثل بنزین، نفت سفید و گازوئیل استفاده نمایند [۱۲]. در شکل (۷-۱) نمونه‌ای از یک میکرو توربین ۶۰ کیلوواتی نشان داده شده است، همچنین در جدول (۳-۱) عملکرد چند نمونه میکرو توربین آورده شده است.



شکل (۱-۷) : نمونه‌ای از یک میکرو توربین ۶۰ کیلوواتی [۱۲]

جدول (۱-۳) : عملکرد چند نمونه میکرو توربین برای کاربردهای تولید همزمان [۱۲]

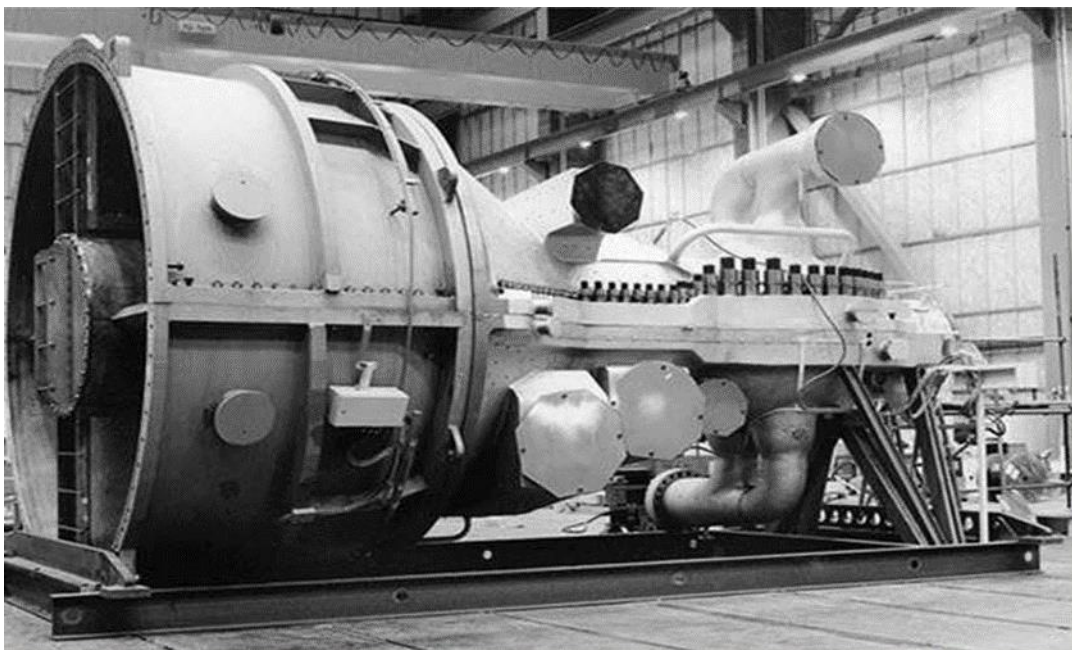
مشخصات و راندمان	واحد	سامانه ۱	سامانه ۲	سامانه ۳
ظرفیت الکتریکی	<i>kW</i>	۳۰	۶۵	۲۵۰
ظرفیت حرارتی	<i>kW</i>	۱۵/۰۷۵	۱۳/۸۹۱	۱۳/۰۸۰
راندمان الکتریکی	%	۲۲/۶	۲۴/۴	۲۶/۰۹
راندمان کل	%	۶۳/۸	۷۱/۲	۶۴

۱-۶-۱-۴ توربین بخار

توربین‌های بخار یکی از متداول‌ترین و قدیمی‌ترین فناوری‌های محرک اولیه بوده و در حال حاضر نیز به‌طور گسترده‌ای جهت تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. تولید برق توسط توربین‌های بخار از حدود یک‌صد سال پیش رایج شده و به دلیل بازدهی بیشتر و هزینه‌های کمتر به‌عنوان جایگزین مناسبی برای ماشین‌های بخار رفت و برگشتی مورد استفاده قرار گرفته است. امروزه در اغلب کشورهای جهان بخش عمده تولید برق توسط توربین‌های بخار صورت می‌پذیرد. ظرفیت توربین‌های بخار تجاری شده در محدوده ۵۰ کیلووات (تولید مقیاس کوچک) تا چند صد مگاوات (تولید نیروگاهی) است. در حال حاضر، در کشورهای مختلف توربین‌های بخار به‌طور گسترده‌ای به منظور تولید همزمان مورد استفاده

قرار می‌گیرد. به طور کلی توربین‌های بخار بر اساس سیکل ترمودینامیکی رنکین عمل می‌کنند و یک چرخه بسته می‌باشند که با تغییر فاز سیال عامل در چرخه ایجاد توان می‌کنند. سپس این بخار در فشار و دمای بالا به پره‌های توربین برخورد کرده و تولید الکتریسیته می‌نماید. سپس باقیمانده گرمای اضافی پس از عبور از بازیاب‌ها، کندانسورها و مبدل‌های حرارتی برای مصارف دیگر به عنوان مثال در چیلرهای جذبی برای ایجاد برودت، حرارت و غیره استفاده می‌گردد. اثرات زیست‌محیطی این نوع از محرک‌ها در مقایسه با محرک‌های اولیه دیگر بسیار کمتر هست، زیرا در این نوع سیکل‌ها به دلیل بسته بودن سیکل و چرخش سیال عامل همراه با تغییر فاز در کل چرخه، باعث گردیده که امروزه تمایل به استفاده بیشتر از این نوع محرک‌های اولیه بیشتر گردد سوخت‌های قابل استفاده در توربین بخار که صرف گرم کردن سیال عامل (معمولاً آب) درون دیگ بخارها و مبدل‌های حرارتی می‌گردد؛ شامل گاز طبیعی، سوخت‌های مایع سبک و سنگین، سوخت‌های جامد مثل انواع زغال سنگ، چوب و ... است [۷]. امروزه توربین‌های بخار با سیال‌های عامل دیگر نیز عمل می‌کنند که معمولاً محدوده دمایی خاصی را شامل می‌گردند. محدوده دمایی سیکل‌های رنکین بخار معمولاً در دماهای بالاتر از 300°C هست. اما محدوده دمایی سیکل‌های رنکین آلی^۱ در دماهای 55°C تا 150°C یا در دماهای متوسط 150°C تا 300°C هست. سیال عامل در این نوع سیکل‌ها، از ترکیبات آلی هست که به‌عنوان مثال می‌توان به ان-اکتان، ایزوبوتان، ایزوپنتان، R134، R254، R254fa و غیره اشاره نمود. در شکل (۸-۱) نمونه‌ای از یک توربین بخار نشان داده شده است.

^۱ Organic Rankine cycle



شکل (۸-۱): توربین بخار [۷]

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

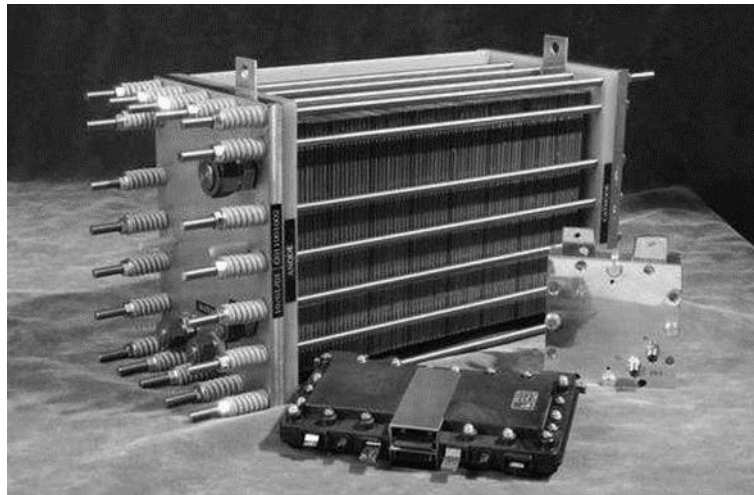
جدول (۴-۱): عملکرد توربین بخار با ظرفیت‌های مختلف برای کاربردهای تولید همزمان [۷]

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

۱-۶-۵- پیل سوختی

پیل سوختی فرآیند تولید الکتریسیته کاملاً متفاوتی با سایر روش‌ها و فناوری‌های محرک‌های اولیه دارد. پیل‌های سوختی همانند باتری‌ها از طریق یک یا چند فرآیند الکتروشیمیایی، الکتریسیته جریان مستقیم تولید می‌نمایند. البته توان الکتریکی باتری‌ها میزان محدودی داشته و با توجه به انرژی ذخیره شده تحویل می‌گردد. یکی از ویژگی‌های پیل سوختی آن است که برخلاف بسیاری از محرک‌های اولیه، تولید الکتریسیته از منبع انرژی توسط پیل سوختی بدون نیاز به فرآیند احتراق صورت می‌پذیرد. توسعه

پیل‌های سوختی به‌عنوان یکی از گزینه‌های تولید برق برای آینده حدوداً از چهل سال پیش شروع شده است؛ اما این فناوری به دلایلی مثل گرانی، پیچیدگی، ظرفیت کم و قابلیت اطمینان اثبات نشده هنوز نتوانسته است بازار تجاری عمده‌ای را به خود اختصاص دهد. البته مزایای پیل‌های سوختی از جمله منافع زیست‌محیطی، بازدهی بالا به‌گونه‌ای است که در برخی از کشورها این نوع فناوری مورد حمایت و تشویق دولت‌ها قرار گرفته است.



شکل (۹-۱) : پیل سوختی با ظرفیت ۵ کیلووات [۱۳]

۱-۶-۱-۶ موتور استرلینگ

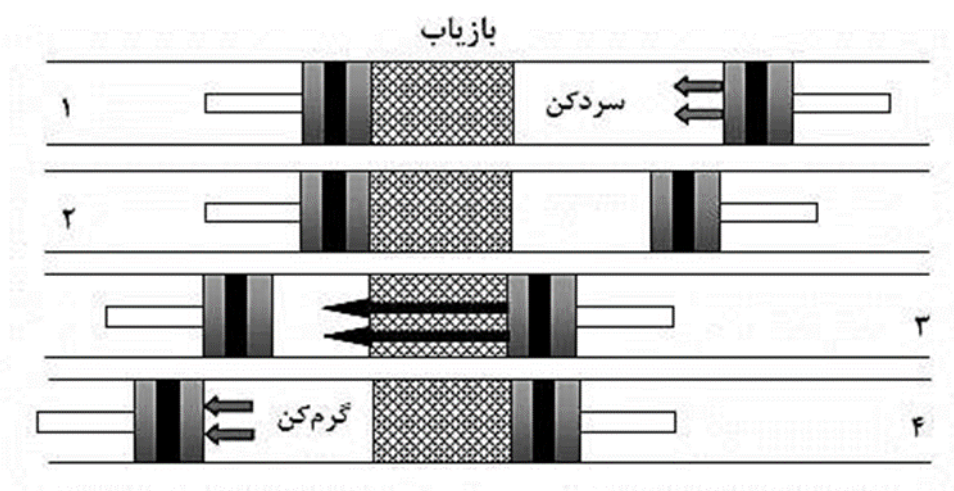
موتور استرلینگ اولین بار توسط رابرت استرلینگ^۱ در سال ۱۸۱۶ ثبت اختراع شد. موتور استرلینگ یک موتور برون سوز است که با استفاده از یک منبع گرمایی قادر به تولید قدرت هست. این موتور از نظر تئوری به دلیل داشتن راندمان حرارتی نزدیک به سیکل کارنو^۲، در مقایسه با موتورهای حرارتی دیگر، راندمان حرارتی بالاتری دارد [۱۴]. همچنین به دلیل سروصدای کم، امکان استفاده از تمامی سوخت‌های فسیلی، زیست‌توده^۳ (مانند تراشه‌های چوب)، هسته‌ای و انرژی خورشیدی جهت فراهم کردن منبع

^۱ Robert Stirling

^۲ Carnot

^۳ Biomass

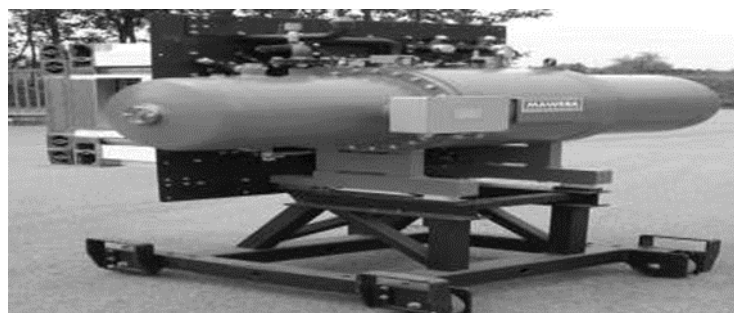
گرمایی [۱۵]، اخیراً علاقه‌مندان زیادی را به سمت خود جذب کرده است. از سویی دیگر موتور استرلینگ جهت تولید قدرت، مقدار قابل توجهی گرما را از دست می‌دهد که می‌توان از این گرمای تلف‌شده جهت مقاصد سودمندی استفاده نمود. طرح تولید همزمان گرما و برق (CHP)^۱ با محرک اولیه موتور استرلینگ نیز یکی از ایده‌های جدیدی است که امروزه توسط شرکت‌های تولیدکننده این فناوری تجاری شده و در کاربردهای خانگی از آن استفاده می‌شود [۱۶]. در شکل (۱-۱۰) نحوه عملکرد موتور استرلینگ به صورت کلی نشان داده شده است [۱۷].



شکل (۱-۱۰) : نحوه عملکرد موتور استرلینگ [۱۷]

در شکل (۱-۱۱) نمونه‌ای از یک موتور استرلینگ با ظرفیت ۳۵ کیلووات نشان داده شده است. در جدول (۱-۶) مشخصات عملکردی موتور استرلینگ ۵۵ کیلوواتی آورده شده است.

^۱ Combined Heating and Power



شکل (۱-۱۱) : موتور استرلینگ با ظرفیت ۳۵ کیلوواتی [۱۰]

جدول (۱-۵) : مشخصات عملکردی موتور استرلینگ ۵۵ کیلوواتی برای کاربردهای تولید همزمان [۱۰]

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

در جدول (۱-۷) نیز مزایا، معایب و ظرفیت محرکه‌های اولیه بیان شده است.

جدول (۱-۶) : مزایا، معایب و ظرفیت محرکه‌های اولیه [۶]

نوع فناوری	مزایا	معایب	ظرفیت
موتورهای رفت و برگشتی	بازدهی بالا همراه با قابلیت بهره‌برداری دربار جزئی	هزینه تعمیرات زیاد کاربردهای CHP محدود به دمای کم	کمتر از ۵ مگاوات
نوع جرقه‌ای	راه‌اندازی سریع سرمایه‌گذاری نسبتاً کم	آلایندگی نسبتاً زیاد هوا نیاز به خنک‌سازی	
نوع تراکمی	امکان اجرای تعمیرات اساسی با استفاده از کارکنان محلی امکان بهره‌برداری از سوخت گاز با فشار کم	نویزهای فرکانس پایین به میزان زیاد	با سرعت زیاد: کمتر از ۴ مگاوات با سرعت کم: بین ۴ الی ۷۵ مگاوات
توربین گاز	قابلیت اطمینان بالا آلایندگی کم گرمای قابل دسترس با کیفیت بالا عدم نیاز به خنک‌سازی	نیاز به سوخت گازی با فشار قوی بازدهی کم دربار پایین	۵۰۰ کیلووات الی ۲۵۰ مگاوات

راه‌اندازی کند	قابلیت اطمینان بالا بازدهی کلی بالا استفاده از انواع سوخت طول عمر زیاد قابلیت تغییر نسبت تولید برق به گرما	توربین بخار	۵۰ کیلووات الی ۲۵۰ مگاوات
هزینه بالا بازدهی مکانیکی نسبتاً کم کاربردهای CHP محدود به دمای کم	قسمت‌های متحرک کم ابعاد کوچک و وزن سبک، آلاینده‌گی کم، عدم نیاز به خنک‌سازی	میکرو توربین	۳۰ الی ۲۵۰ مگاوات
هزینه بالا نیاز به فراوری سوخت	آلاینده‌گی کم سروصدای کم بازدهی بالا درباره‌ای مختلف	پیل سوختی	۵ کیلووات الی ۲ مگاوات

در جدول (۸-۱) مقایسه ویژگی بین محرک‌های اولیه آورده شده است.

جدول (۷-۱) : مقایسه ویژگی محرک‌های اولیه [۱۶]

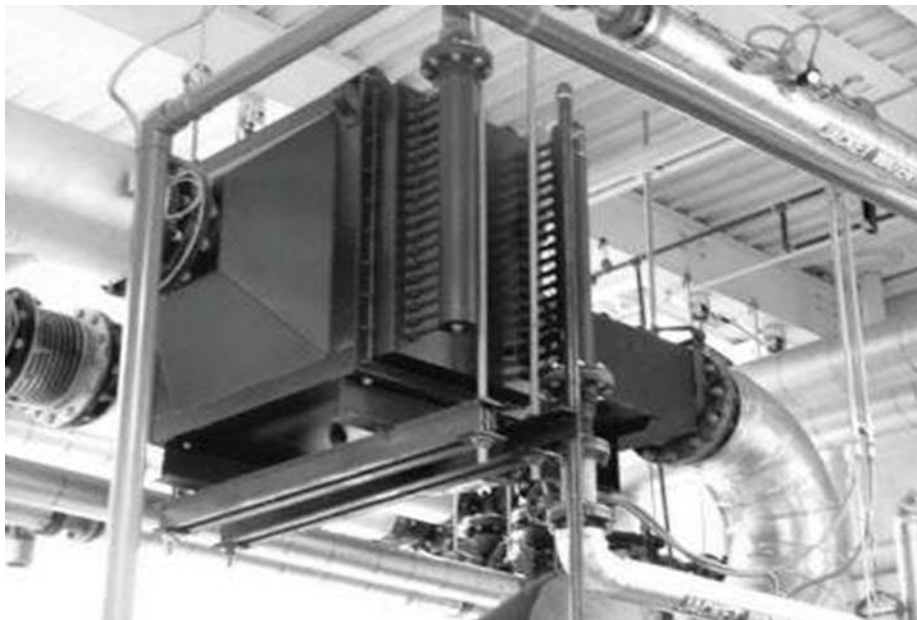
مشخصات	موتورهای احتراق داخلی	توربین گاز	توربین بخار	میکرو توربین	پیل سوختی
بازدهی الکتریکی	۲۵-۴۵٪	۲۵-۴۲٪	۱۵-۳۸٪	۱۵-۳۰٪	۳۷-۶۰٪
بازدهی کلی	۷۰-۸۰٪	۵۰-۷۰٪	۸۰٪	۶۵-۷۵٪	۵۵-۸۰٪
زمان راه‌اندازی	۱۰ ثانیه	۱۰ دقیقه تا ۱ ساعت	۱ ساعت تا ۱ روز	۶۰ ثانیه	۳ ساعت تا ۲ روز
انواع سوخت	گاز طبیعی، بیوگاز، پروپان، گازوئیل	گاز طبیعی، بیوگاز، پروپان، گازوئیل	تمامی سوخت‌ها	گاز طبیعی، بیوگاز، پروپان، گازوئیل	هیدروژن، گاز طبیعی، پروپان، متانول
سروصدا	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	کم
کاربردهای گرما خروجی	آب گرم، بخار فشار پایین	گرمایش فرایند، آب گرم، بخار فشار پایین و بالا	بخار فشار پایین و بالا	گرمایش فرایند، آب گرم، بخار فشار پایین	آب گرم، بخار فشار پایین و بالا

۱-۶-۲ تجهیزات الکتریکی

برای سیستم های تولید همزمان تجهیزات الکتریکی که استفاده می شود. شامل ژنراتورها، ترانسفورمرها، مدار شکن ها، رله ها، کنتورها، کنترل ها، خطوط انتقال و دیگر تجهیزات وابسته است. لازم به ذکر است که در سیستم های تولید همزمان علاوه بر تجهیزات الکتریکی که برای تولید توان مورد استفاده قرار می گیرد. ممکن است نیاز به تجهیزاتی که برای فروش برق به شبکه لازم است نیز باشد [۹].

۱-۶-۳ دستگاه های بازیافت حرارت

تاکنون فناوری های متعددی برای بازیافت گرما توسعه و به کار گرفته شده است. فناوری های بازیافت گرما با بهره گیری از قوانین و مفاهیم ترمودینامیکی، به بررسی پتانسیل های سیستم برای استفاده مؤثر از انرژی موجود در آن به کار گرفته می شوند. بازیافت حرارتی معمولاً توسط مبدل های خاص حرارتی صورت می گیرد. از جمله این مبدل ها، مولد بخار بازیافت حرارت (HRSG) است. شکل (۱-۱۲) نمونه ای از یک مبدل حرارتی سیستم تولید همزمان را نشان می دهد.



شکل (۱-۱۲) : نمونه یک مبدل حرارتی سیستم تولید همزمان [۱۰]

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

۴-۶-۱ چیلر جذبی

چیلرهای جذبی از تمامی یا بخشی از، انرژی حرارتی موجود در سیستم‌های تولید همزمان استفاده کرده و سرمایه‌ش تولید می‌کنند. در چیلرهای جذبی از سیالات و سیکل ترمودینامیکی مشخصی استفاده می‌شود که درجه حرارت‌های پایین را بدون نیاز به یک کمپرسور بخار ایجاد می‌کنند. یک چیلر جذبی بجای استفاده از کمپرسور بخار از پمپ‌های مایع و منابع با درجه حرارت پایین مثل آب گرم، بخار یا گاز دودکش استفاده می‌کند، در چیلرهای جذبی از سیالات محلولی استفاده می‌شود که از دو جزء تشکیل شده‌اند. اصول کلی عملکرد چیلر جذبی بر این اساس است که بعد از پمپ شدن محلول به فشار بالا، از انرژی با درجه حرارت پایین برای تبخیر یک جزء محلول استفاده می‌شود. از این جزء به‌عنوان مبرد در سیکل استفاده شده و نمونه‌هایی از محلول‌ها به شرح زیر است.

• آب و آمونیاک

- لیتیوم بروماید و آب
- لیتیوم کلراید و آب

در مورد اول آمونیاک به عنوان مبرد بوده و در دو مورد دیگر آب به عنوان مبرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کاربردهای تولید همزمان ویژگی مهم چیلرهای جذبی این است که آن‌ها از انرژی درجه حرارت نسبتاً پایین که به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم از محرک اولیه به دست می‌آید، می‌توانند برای تولید آب سرد در سرمایش استفاده کنند. خروجی حرارتی یک سیستم تولید همزمان را می‌توان برای گرمایش در خلال فصل سرد سال و یا استفاده از چیلر جذبی برای سرمایش در خلال فصل گرم سال استفاده کرد. در آب‌وهوای گرم چیلر جذبی یک جز مهم از جهت فنی و اقتصادی در موفقیت سیستم‌های تولید همزمان است [۱۰].

۱-۷ جمع بندی

در قسمت های قبل ابتدا در مورد افزایش تقاضا مصرف انرژی، افزایش هزینه‌های تولید انرژی و افزایش آلاینده‌گی و نگرانی های زیست محیطی سخن گفته شد. در ادامه مباحث سیستم‌های تولید همزمان معرفی شده و با سیستم‌های سنتی تولید انرژی مقایسه گردید. سپس مزایای سیستم‌های تولید همزمان و اجزای آن ذکر گردید. در فصل بعدی بخشی از کارهای گذشته در زمینه‌های سیستم های تولید همزمان بر اساس محرک اولیه توربین بخار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل سوم، مدل سازی و روابط حاکم بر سیکل و اجزای سیستم تولید همزمان سه گانه بیان می‌گردد. در فصل چهارم مطالعه‌ی صورت گرفته تشریح و در فصل پنجم نتایج به همراه پیشنهادات ارائه شده است.

فصل ۲ : مروری بر کارهای گذشته

۲-۱ مروری بر کارهای انجام شده

در این بخش ابتدا بخشی از تحقیقات انجام شده در زمینه سیستم‌های تولید همزمان بررسی شده است. سپس قسمتی از نتایج مطالعات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی توربین بخار و مدل‌سازی سیستم تولید همزمان با محرک اولیه توربین بخار ارائه شده است.

۲-۱-۱ تحقیقات پیشین با صرف نظر از نوع محرک اولیه

گو و همکاران [۱۹] مطالعاتی را بر روی سیستم‌های تولید همزمان جهت کاربردهای مسکونی انجام دادند. آنها برای تعیین ظرفیت سیستم تولید همزمان از روش ماکزیمم مستطیل برای دو حالت عملکردی گرما و برق استفاده نمودند.

سیستم CCHP دارای ساختار پیچیده و جریان‌های متنوع انرژی است. به خاطر همین، نحوه مدیریت یک کلید اساسی و مهم برای افزایش بهره‌وری این سیستم‌ها است. این موضوع در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. کاردنا^۱ و همکاران [۲۰-۲۱] یک استراتژی مدیریت بهینه سیستم تولید همزمان با در نظر گرفتن ویژگی‌های فنی اجزا معرفی کردند. این سیستم بر اساس مدیریت تقاضای حرارتی^۲ و مدیریت تقاضای برق^۳ است.

در مطالعه‌ای دیگر ماگو و چامرا^۴ [۲۲] ارزیابی و بهینه‌سازی سیستم CCHP را با اولویت بار حرارتی (FTL)^۵ و اولویت بار الکتریکی (FEL)^۶ بر پایه مصرف انرژی اولیه، هزینه‌های عملیاتی و تولید گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن انجام دادند. علاوه بر این، این مقاله شامل آنالیز و ارزیابی استراتژی

^۱ Cardona

^۲ Thermal Demand Management

^۳ Electric Demand Management

^۴ Mago and Chamra

^۵ Following the Thermal Load

^۶ Following the Electric Load

عملیات بهینه‌سازی است. سیستم CCHP در طول فعالیت خود زیر بار ترکیبی برق و حرارت قرار دارد. آن‌ها متوجه شدند که با اولویت بار حرارتی انرژی اولیه مطلوب به میزان ۷/۵ درصد و هزینه‌ها به میزان ۴/۴ درصد کاهش می‌یابد. در زمان اولویت بار الکتریکی انتشار گاز دی‌اکسیدکربن به میزان ۱۴/۸ درصد کاهش می‌یابد. کاردونا و پیاسنتینو [۲۳-۲۴] نیز سیستم‌های CHP را با اولویت بار حرارتی و اولویت بار الکتریکی مدل کردند. انتخاب بین این دو استراتژی بستگی به ظرفیت محرک اولیه و شرایط دیگر مثل امکان فروش برق به شبکه و یا ذخیره‌سازی آن برای مصارف بعدی دارد. فومو^۱ و همکاران [۲۵] یک سیستم CCHP که شامل چیلر جذبی و سیستم فشرده‌سازی بخار است را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر ظرفیت مکانیزم خنک‌کننده و ظرفیت واحد تولید برق را بر راندمان بررسی کردند. همچنین استراتژی اولویت بار الکتریکی را نیز بررسی کردند.

قاسم زاده و همکاران [۲۶] به طراحی سیستم تولید همزمان سه‌گانه برای یک مجتمع مسکونی در اقلیم آب و هوای تهران پرداختند. معیار سنجش آنها در انتخاب ظرفیت بهینه روش ماکزیمم مستطیل، کاهش آلاینده‌ها و صرفه جویی در مصرف انرژی بود. آن‌ها همچنین دوره بازگشت سرمایه بدون در نظر گرفتن ارزش زمانی پس از تعیین ظرفیت محاسبه کردند.

کشاوری و همکاران [۲۷] یک تابع چند هدفه برای طراحی اندازه و استراتژی بهینه محرک اصلی یک خنک‌کننده ترکیبی در سیستم‌های تولید همزمان ارائه دادند. آنها میزان صرفه جویی در مصرف سوخت و راندمان انرژی را به عنوان پارامترهای ترمودینامیکی و دوره بازگشت سرمایه و کاهش گازهای گلخانه‌ای را به ترتیب به ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی در نظر گرفتند.

کاو و لیو^۲ [۲۸] عملکرد سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش یک ساختمان معمولی را با استفاده از آنالیزهای ترمودینامیکی و ترمواکونومیکی بر پایه شبیه‌سازی عملکرد طراحی و عملکرد

^۱ Fomu

^۲ Cao and Liu

بهینه‌سازی سیستم مورد بررسی قراردادند. در بهینه‌سازی آن‌ها از دو تابع هدف راندمان انرژی و سود ناخالص کل استفاده کردند. نتایج نشان داد که اگر نرخ بار به اندازه کافی بالا باشد استفاده از این سیستم مزایای بسیاری دارد.

لی^۱ و همکاران [۲۹] روشی برای ارزیابی مصرف انرژی اولیه برای CCHP و تولید جداگانه ارائه کردند. علاوه بر این آن‌ها از نرخ صرفه‌جویی انرژی سوخت (FESR)^۲ استفاده و آن را معرفی کردند. آن‌ها دریافتند که سیستم تولید همزمان با تولید برق زیاد پتانسیل بیشتری برای صرفه‌جویی انرژی دارد. چو^۳ و همکاران [۳۰] یک الگوریتم انرژی را معرفی کردند که هزینه‌های انرژی را بر اساس محدودیت‌های راندمان انرژی برای هر جز با استفاده از یک مدل جریان شبکه برای یک سیستم CHP معمولی ارائه می‌دهد. الگوریتم سیگنال‌های عملیاتی را برای CHP فراهم می‌کند.

۲-۱-۲ تحقیقات پیشین با توجه به نوع محرک اولیه

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

۱-۲-۱-۲ موتور احتراق داخلی

مطالعات متعددی بر روی سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه موتور احتراق داخلی صورت گرفته است. اchiایی و همکاران [۳۱] استفاده از موتور احتراق داخلی به عنوان محرک اولیه برای تأمین نیاز سرمایشی، گرمایشی و برق یک ساختمان در شهر تهران را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش آنالیز انرژی و ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی صورت گرفته است.

^۱ Li

^۲ Fuel Energy Saving Ratio

^۳ Cho

پس بی سیل^۱ و همکاران [۳۲] سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه و دوگانه^۲ را برای تأمین انرژی یک ساختمان بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که در مقایسه با سیستم تولید جداگانه برق، گرمایش و سرمایش سیستم تولید همزمان دوگانه به میزان ۳۱٪ و سیستم تولید همزمان سه‌گانه به میزان ۳۹٪ در مصرف انرژی اولیه صرفه‌جویی می‌کند.

آنالیزهای اقتصادی نیز بر روی سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه موتور احتراق داخلی صورت گرفت. چیکو و مانکارلا^۳ [۳۳] شش طرح مختلف را برای تولید سرمایش باهم مقایسه کردند که یکی از طرح‌ها سیستم تولید همزمان سه‌گانه هست. آن‌ها اثر نوسانات قیمت برق و گاز را روی زمان بازپرداخت مورد مطالعه قراردادند. این آنالیز یک تصویر منطقی خوبی برای مقایسه راه‌حل‌های مختلف ارائه کرد.

۲-۲-۱-۲ توربین گاز

مطالعات متفاوتی بر روی سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه توربین گاز صورت گرفته است. احمدی و همکاران [۳۴] به مدل‌سازی یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه که شامل توربین گاز، سیکل رانکین آلی، چیلر جذبی و آب گرمکن خانگی است پرداخته‌اند. آن‌ها سیستم را از سه دیدگاه انرژی زیست محیطی و انرژی‌مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر احمدی و دینسر [۳۵] تحلیل ترمودینامیکی و تحلیل انرژی‌زیست محیطی با محرک توربین گاز برای یک سیستم تولید همزمان را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه اثر پارامترهای عملکردی مانند: بازده ایزنتروپیک توربین، دمای ورودی به محفظه احتراق، نسبت فشار کمپرسور و بازده ایزنتروپیک کمپرسور را بر روی بازده انرژی و نرخ کلی هزینه‌های زیست محیطی مورد بررسی قرار گرفت.

^۱ Pospisil

^۲ Cogeneration

^۳ Chicco and Mancarella

۲-۱-۲-۳ میکرو توربین

صنایع و همکاران [۳۶] به بررسی تعیین ظرفیت سیستم تولید همزمان برق و حرارت با محرک میکروتوربین پرداخته‌اند. در این مطالعه آن‌ها مقدار بازگشت سرمایه را برای حالت‌های مختلف سیستم به دست آورده‌اند.

در مطالعه‌ای دیگر عامری و همکاران [۳۷] به بررسی سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه میکروتوربین پرداخته‌اند. آن‌ها میزان کاهش صرفه جویی در مصرف انرژی سوخت در مقایسه با سیستم‌های تولید جداگانه و همچنین بازگشت سرمایه را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

۲-۱-۲-۴ پیل سوختی

مطالعاتی بر روی سیستم‌های تولید همزمان شامل پیل سوختی به عنوان محرک اولیه صورت گرفت. ولکان و همکاران [۳۸] به مطالعه ترکیب پیل سوختی و توربین گاز به عنوان محرک اولیه سیستم‌های تولید همزمان پرداخته‌اند. آن‌ها سیستم تولید همزمان را از دیدگاه انرژی مورد بررسی قرار دادند. آدام و همکاران [۳۹] به بررسی استفاده از سیستم‌های تولید همزمان بر پایه پیل‌های سوختی مختلف برای کاربردهای ساختمانی پرداخته است و مناسب بودن این سیستم برای کاربردهای ساختمانی به دلیل راندمان بالا و چگالی قدرت را پیشنهاد داده است. دادس و همکاران [۴۰] یک سیستم تولید همزمان با محرک اولیه پیل سوختی اسید فسفریک را بررسی کردند. بررسی‌ها نشان داد که راندمان الکتریکی پیل‌های سوختی اسید فسفریک بین ۳۷٪-۴۲٪ است. اما زمانی که پیل سوختی اسید فسفریک در سیستم‌های تولید همزمان به کار گرفته شوند، راندمان آن‌ها به ۸۵٪ می‌رسد.

چهارطاقی و علی زاده [۴۱] یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه برای کاربردهای ساختمانی از چهار دیدگاه مختلف انرژی، انرژی، صرفه‌جویی سوخت و آلاینده‌گی مورد بررسی قرار داده و با سیستم‌های سنتی مقایسه گردید.

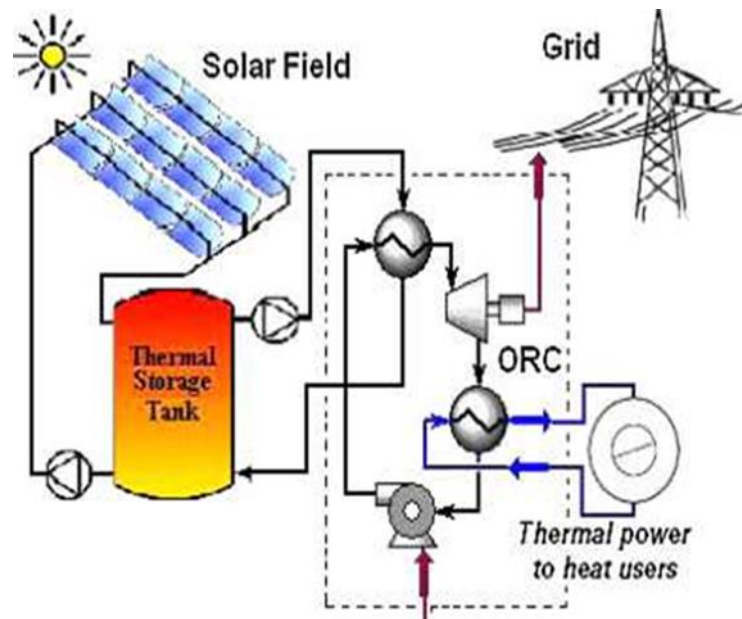
۲-۱-۲-۵ موتور استرلینگ

کرمی و صیادی [۴۲] به مطالعه بهینه‌سازی ظرفیت سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک موتور استرلینگ برای چهار اقلیم آب و هوایی در ایران پرداخته‌اند. توابع هدفی که مورد ارزیابی قرار دادند شامل: صرفه جویی در مصرف انرژی، کاهش تولید آلاینده‌ها و صرفه جویی در هزینه‌های کل سالیانه می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که محرک اولیه موتور استرلینگ در آب و هوای خیلی گرم و مرطوب مناسب نیست.

۲-۱-۲-۶ توربین بخار

یکی از مهم‌ترین محرک‌های اولیه، که در سیستم‌های تولید همزمان استفاده می‌شود. توربین بخار بوده که براساس سیکل ترمودینامیکی رنکین عمل می‌کند. سیال درون این سیکل یک چرخه بسته را طی کرده و با تغییر فاز سیال عامل در چرخه ایجاد توان می‌کند. بویلر این محرک قادر است. با سوخت‌های مختلفی مانند: مازوت، گاز طبیعی، زیست توده و... کار کند و این که امروزه از انرژی بازیافتی، انرژی خورشیدی هم می‌توان صرف گرم کردن سیال درون مبدل‌های حرارتی استفاده کرد. سپس این بخار در دما و فشار بالا به پره‌های توربین برخورد کرده و با تبدیل انرژی حرارتی به مکانیکی برق تولید می‌شود. سپس باقیمانده گرمای اضافی پس از عبور از بازیاب‌ها، کندانسورها و مبدل‌های حرارتی برای مصارف دیگر به‌عنوان مثال در چیلرهای جذبی برای ایجاد برودت، حرارت و غیره استفاده می‌گردد. اثرات زیست‌محیطی این نوع از محرک‌ها در مقایسه با محرک‌های اولیه دیگر بسیار کمتر می‌باشد، زیرا در این نوع سیکل‌ها به دلیل بسته بودن سیکل و چرخش سیال عامل همراه با تغییر فاز در کل چرخه هست. امروزه توربین‌های بخار با سیال‌های عامل دیگر نیز به کار برده می‌شوند، که معمولاً محدوده دمایی خاصی را شامل می‌گردند. محدوده دمایی سیکل‌های رنکین بخار معمولاً در دماهای بالاتر از 300°C می‌باشد. اما محدوده دمایی سیکل‌های رنکین آلی در محدوده دماهای 55°C تا 150°C یا در دماهای متوسط 150°C تا 300°C می‌باشد. سیال عامل در این نوع

سیکل‌ها، از ترکیبات آلی می‌باشد که به‌عنوان مثال می‌توان به ان-اکتان، ایزو بوتان، ایزوپنتان، R254fa، R254، R134 و غیره اشاره نمود. در شکل (۱-۲) یک سیکل تولید همزمان با محرک سیکل رنکین آلی نشان داده شده است.



شکل (۱-۲): سیستم تولید همزمان با محرک اولیه سیکل رنکین آلی [۴۳]

آل سلیمان و همکاران [۴۳] به مطالعه انرژی و انرژی و انرژی یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه زیست توده که با چرخه رنکین آلی راه اندازی شده پرداخته‌اند. چهار مورد، توان الکتریکی، توان تولید همزمان الکتریکی و سرمایش، توان تولید همزمان الکتریکی و گرمایش و توان سیستم تولید سه‌گانه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بهترین عملکرد سیستم تولید همزمان سه‌گانه در نظر گرفته‌شده با کمترین دمای پینچ تبخیرکننده ORC و کمترین دمای حداقل ORC، در نظر گرفته‌شده است.

کستا^۱ و همکاران [۴۴] عملکرد اقتصادی سیستم تولید همزمان سه‌گانه را آنالیز کردند. آن‌ها عملکرد تولید همزمان سه‌گانه و دوگانه و پمپ حرارتی جذبی را باهم مقایسه کردند. پمپ حرارتی جذبی^۲ برای این که بیشترین کاهش مصرف انرژی را با صرف نظر از تولید برق داشت، انتخاب گردید. بررسی‌ها نشان داد که سیستم تولید همزمان سه‌گانه دارای بیشترین راندمان است. اما از آن جایی که سیستم تولید همزمان دوگانه، سرما و پمپ حرارت جذبی، برق تولید نمی‌کند. این نتایج نمی‌تواند درست باشد. پردس و همکاران [۴۵] به بررسی راندمان انرژی و انرژی چیلرهای خنک‌کننده که در سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه توربین بخار استفاده شده‌اند پرداخته‌اند. آن‌ها پنج سیستم سرمایه‌ی مختلف که چهارتا از آن‌ها چیلرهای جذبی متفاوت و آخری کمپرسور الکتریکی است، را باهم مقایسه کردند. نتایج آنالیز نشان داد که راندمان چیلرهای جذبی زمانی که در سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه فعالیت می‌کنند به مراتب بیشتر از راندمان این چیلرها زمانی که به‌طور مجزا فعالیت می‌کنند است.

با توجه به کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش گازهای گلخانه‌ای توسعه سیستم‌های مؤثرتر جهت افزایش راندمان انرژی و کاهش آلاینده‌ی ضروری است. اما از آن جایی که راندمان نیروگاه‌های معمولی کم‌تر از ۴۰٪ است و در واقع ۶۰٪ یا بخش بیشتری از انرژی یک سیستم توسط محرک اولیه توربین بخار استفاده نمی‌شود. همچنین کارایی حرارتی کلی نیروگاه معمولی که به‌طور جداگانه برق و گرما تولید می‌کند حدود ۶۰٪ می‌باشد [۴۶].

^۱ Costa

^۲ Absorption Heat Pump

لین^۱ و همکاران [۴۷] پتانسیل حرارتی توربین بخار برای استفاده در سیستم تولید همزمان با سوخت زیست توده را مورد بررسی قرار دادند. آن ها در مطالعه خود چهار مورد مختلف از درصد تخریب آگرژی و هزینه کل تولید را بررسی کردند.

در تحقیقی دیگر از آل سلیمان و همکاران [۴۸] که به بررسی انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارزیابی آگرژی چرخه رنگین آلی برای سرمایش، گرمایش و برق با احتراق زیست توده به عنوان یک سیستم سه گانه در نظر گرفته شده است پرداخته شده است. تأثیر پارامترهای عملکردی خروجی و محیطی مختلفی مانند، انتشار گازهای گلخانه‌ای درجه حرارت نقطه پینچ تبخیر کننده، درجه حرارت ورودی پمپ و فشار ورودی به توربین بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگر از سیستم‌های تولید همزمان سه گانه استفاده شود. موجب بالا رفتن انرژی و آگرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با سیستم های تولید مجزا می شود.

واج و گامبروتا^۲ [۴۹] که از ترکیب یک سیکل هیبریدی رنگین آلی با یک موتور احتراق داخلی استفاده نمودند. نتایج بررسی نشان می‌دهد که با اضافه نمودن سیکل رنگین آلی به سیستم بازده کلی آن ۱۲٪ افزایش خواهد یافت.

همچنین وانگ^۳ و همکاران [۵۰] ترکیب سیستم تجمیع شده سیکل رنگین آلی و سیکل تراکمی بخار را مورد مطالعه قرار دادند. که در این سیستم ها از گرمای اضافی بازیافتی از سیستم‌های دیگر برای منبع انرژی اولیه در سیکل رنگین آلی استفاده شده است. آن ها نشان دادند ضریب عملکرد سیستم در استفاده از منابع مختلف از ۰/۴۸ به ۰/۶۶ می‌رسد. در یک مطالعه دیگر هی^۴ و همکاران [۵۱] از بازیافت گرمای اضافی در یک موتور احتراق داخلی به عنوان منبع انرژی اولیه برای دو سیستم هیبرید سیکل

^۱ Lian

^۲ Vaja and Gambarotta

^۳ Wang

^۴ He

رنکین آلی و سیکل کالینا^۱ استفاده نمودند.

در پژوهشی دیگر آل - سلیمان و همکاران [۵۲] یک تحلیل انرژی بر روی یک سیستم تولید سه‌گانه بر پایه پیل سوختی اکسید جامد انجام دادند و نشان دادند که حداقل یک مقدار ۲۲٪ در بازده سیستم تولید سه‌گانه در مقایسه با سیکل توان هیبریدی (پیل سوختی اکسید جامد و سیکل رنکین آلی) به دست می‌آید. همچنین نتایج نشان داد که حداکثر کارایی در هنگام تولید سه‌گانه (الکتریسیته، حرارت و برودت) ۷۴٪، در حالت تولید دوگانه (الکتریسیته و حرارت) ۷۱٪ در حالت تولید دوگانه (الکتریسیته و برودت) ۵۷٪ و در حالت تولید الکتریسیته ۴۶٪ می‌باشد.

با توجه به نتایج این تحقیق کارایی سیستم در هنگام تولید سه‌گانه نسبت به حالت‌های دیگر مشخص گردید و اهمیت تحلیل انرژی و زیست محیطی مشخص شد. این نکته را باید یادآور شد که صرف تحلیل‌ها برای مهیا نمودن بهترین سیستم و پیکربندی بهینه برای سیستم‌های تولید همزمان کافی نبوده، بلکه بهینه‌سازی این سیستم‌ها در نقطه طراحی و در حالت عملکردی نیز باید مدنظر قرار گیرد.

۲-۲ بهینه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان

مطالعه و بررسی بر روی بهینه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان یکی از مهمترین زمینه‌های تحقیقاتی است که بر روی سیستم‌های تولید همزمان انجام می‌شود. تأثیر پارامترهای عملکردی مانند دما، فشار ورودی به توربین، دمای اواپراتور، دما و فشار کندانسور و بررسی اثرهای آن‌ها از یک طرف و تغییر پارامترهای عملکرد سیستم‌های تولید همزمان مانده بازده انرژی، انرژی، توان خالص خروجی، اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی با آن‌ها باعث شده است که بهینه‌سازی این سیستم‌ها به یکی از مهم‌ترین زمینه‌های مطالعه تبدیل گردد. بهینه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان براساس دو نوع بهینه‌سازی که ذکر شده است صورت می‌گیرد.

¹ Kalina cycle

- بهینه‌سازی تک هدفی^۱
- بهینه‌سازی چند هدفی^۲

منظور از بهینه‌سازی تک هدفه، تعیین یک مقدار بهینه به ازای متغیرهای طراحی و متغیرهای تصمیم‌گیری است که به ازای آن یک هدف معین بهینه گردد.

اما در مورد بهینه‌سازی‌های چند هدفی، باید اشاره نمود که منظور از این نوع بهینه‌سازی‌ها، تعیین شرایطی است که در آن چند تابع هدف با یکدیگر بهینه شوند. به عبارت دیگر در بهینه‌سازی توابع چند هدفی ممکن است نقطه به دست آمده موردنظر، الزاماً برای یک هدف خاص، بهینه نباشد، زیرا هدف تعیین شرایطی است که همه توابع بهینه شوند. درحالی‌که در بهینه‌سازی‌های تک هدفی الزاماً باید نقطه موردنظر، تابع هدف خاصی را بهینه نماید.

بهینه‌سازی چند هدفه در سیستم‌های تولید همزمان پیچیدگی و دشواری خاصی به خاطر متنوع بودن پارامترهای تأثیرگذار دارد. برای جلوگیری از پیچیدگی‌های بیش‌ازحد، پارامترهایی را مدنظر قرار می‌دهند. که سهم بیشتری در تغییرات توابع هدف تعیین شده دارند و از تغییرات پارامترهای دیگر چشم‌پوشی می‌شود. بر این اساس مدل‌سازی و تحلیل ترمودینامیکی (اگرژی)، اقتصادی و زیست‌محیطی دقیق، کمک شایانی به انتخاب صحیح پارامترهای تأثیرگذار بر روی توابع هدف مشخص شده در تحلیل سیستم می‌کند. روش‌های مهمی در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های تولید چندگانه وجود دارد، که الگوریتم‌های تکاملی و یا روشهای جستجوی جهانی تصادفی از آن جمله می‌باشند. از این روشها می‌توان به الگوریتم ژنتیک، الگوریتم مرتب‌سازی غیر برتر، بهینه‌سازی توده اجزا اشاره نمود.

^۱ Single-objective optimization

^۲ Multi-objective optimization

۲-۲-۱ بهینه‌سازی بر اساس توابع هدف ترمودینامیکی

در بهینه‌سازی‌هایی ترمودینامیکی، با کمینه و بیشینه کردن، توابع هدف خاصی که وجود دارند. با توجه به هدف پژوهش می‌توان از آن استفاده کرد. که از این توابع می‌توان به بیشینه کردن کارایی‌ها، کمینه کردن مصرف سوخت، کمینه کردن بازگشت‌ناپذیری‌های سیستم اشاره کرد. در مورد بهینه‌سازی توابع هدف ترمودینامیکی در چند سال اخیر مطالعات بسیار ارزشمندی انجام پذیرفته است.

یکی از این مطالعات توسط ساهو انجام شده است. او با استفاده از تحلیل اگزرژی-زیست‌محیطی بر روی یک سیستم تولید همزمان برای تولید ۵۰ مگاوات الکتریسیته و ۱۵ کیلوگرم بر ثانیه بخار آب در فشار ۲/۵ بار، با استفاده از الگوریتم ژنتیک تکاملی نشان داد که در حالت بهینه هزینه تولید الکتریسیته با استفاده از سیستم‌های تولید همزمان ۹/۹٪ نسبت به سیستم‌های متداول تولید توان پایین‌تر می‌باشد. یاری در مقاله [۵۳] در یک سیکل سرمایه‌گذاری گذر بحرانی دی‌اکسید کربن با استفاده از تحلیل برگشتی در ترم‌های دمای خروجی اواپراتور و کولر گاز برای به دست آوردن مقدار ضریب عملکرد بیشینه، مقادیر بهینه فشار تخلیه و میانی کمپرسور و نسبت کشیدگی بهینه جریان در اجکتور را تعیین نمود. دای و همکاران [۵۴] در یک تحقیق با استفاده از بهینه‌سازی پارامتری به روش الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه پارامترهای عملکردی برای بیشینه کردن بازده اگزرژی به‌عنوان تابع هدف را تعیین کردند. در این از بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری عبارت بودند از: فشار ورودی توربین، دمای ورودی توربین و پس فشار توربین، در این مقاله با استفاده از مقادیر بهینه متغیرهای طراحی که فشار توربین ۷۸۵/۲ مگا پاسکال، دمای ورودی توربین ۱۱۸/۹ درجه سلسیوس و پس فشار توربین ۱۴۶/۲ مگا پاسکال بود مقدار بازده سیستم ۲۷/۱٪ به دست آمد. وانگ و همکاران [55] با استفاده از تحلیل پارامتری عملکرد بهینه سیستم را تعیین نمودند. در این تحقیق بازده اصلاح شده به سیستم یعنی بازده میانگین روزانه به‌عنوان تابع هدف مدنظر قرار گرفت. دو متغیر دما و فشار ورودی توربین نیز به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شدند. با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مقدار بیشینه بازده میانگین روزانه برای سیال

عامل R123 مقدار ۰/۷/۷۹٪، برای R245fa مقدار ۰/۷/۷۰٪ برای ایزو بوتان ۰/۷/۵۶٪ و برای R134a مقدار ۰/۶/۸٪ محاسبه شد.

در یک مقاله دیگر از وانگ و همکاران [۵۶] که در آن از بازده اصلاح شده سیستم به عنوان تابع هدف برای بهینه سازی سیکل کالینا با استفاده از انرژی خورشیدی استفاده گردید، با استفاده از تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم گیری، دما و فشار ورودی توربین و کسر جرمی محلول آمونیاک، مقدار بازده بهینه سیستم ۰/۸/۵۴٪ به دست آمد. در این تحقیق از روش الگوریتم ژنتیک برای تعیین مقادیر بهینه سیستم استفاده شد.

۲-۳ نتیجه گیری از کارهای گذشته

تا امروز پژوهش های زیادی در مورد سیکل های رنگین بخار و سیکل رنگین آلی که در سیستم های تولید همزمان مورد استفاده قرار گرفته است، صورت گرفته است. تحقیقاتی که به بررسی افزایش راندمان سیکل و افزایش کار خروجی و بررسی سیالات کاری پرداخته شده است. سیکل های رنگین بخار و رنگین آلی در زمینه تولید توان به دلیل محدوده دمایی مورد نیاز در آنها، کم بودن مشکلات زیست محیطی نسبت به محرک اولیه های دیگر و سیال عامل های متنوع دیگر، مورد توجه قرار گرفته اند.

۲-۴ معرفی کار حاضر

در کار حاضر از توربین بخار، به عنوان محرک اولیه سیستم های تولید همزمان سه گانه استفاده شده است. اجزای سیستم استفاده شده شامل بویلر، توربین بخار، مبدل حرارتی، چیلر و پمپ می باشد. مدل سازی چیلر جذبی و سیستم تولید همزمان سه گانه به کمک نرم افزار EES انجام گرفته است. البته با توجه به این که مقدار انرژی ورودی محلول لیتیوم بروماید-آب در جداول موجود نیست. از یکی از مدل های معرفی شده برای محاسبه انرژی ورودی محلول استفاده شده است. در ادامه تأثیر پارامترهای دما و فشار ورودی به توربین

بخار روی راندمان، درصد کاهش مصرف انرژی اولیه، درصد کاهش انتشار آلاینده‌گی و درصد کاهش هزینه‌های عملکرد سیستم، مورد بررسی قرار گرفته است و با سیستم‌های سنتی تولید برق، حرارت و سرما مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه توربین بخار از سه دیدگاه انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته و مقدار بهینه هزینه‌های کلی با متغیر تصمیم دما و فشار ورودی به توربین بخار، راندمان ایزنتروپیک توربین بخار و راندمان مبدل حرارتی انجام شده است. در زیر به اختصار نوآوری و نکات برجسته صورت گرفته در این مطالعه نسبت به تحقیقات گذشته آورده شده است.

- تحلیل انرژی چیلر جذبی سیستم تولید همزمان سه‌گانه در شرایط عملکردی مختلف بررسی شده است.
- تأثیر پارامترهای دما و فشار ورودی به توربین بخار روی راندمان، درصد کاهش مصرف انرژی اولیه، درصد کاهش انتشار آلاینده‌گی و درصد کاهش هزینه‌های عملکرد سیستم تولید همزمان سه‌گانه بررسی شده است.
- بهینه‌سازی هزینه‌های کلی سالیانه با روش الگوریتم ژنتیک با متغیر تصمیم دما و فشار ورودی به توربین بخار، راندمان ایزنتروپیک توربین بخار و راندمان مبدل حرارتی انجام شده است.
- سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه توربین بخار از سه دیدگاه انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در حالی که در عمده کارهایی که به بررسی عملکرد سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه توربین بخار پرداخته شده است به تحلیل یک یا دو دیدگاه بسنده شده است.

- در تحقیقات انجام شده از سیکل رنگین معمولی برای استفاده در سیستم های تولید همزمان سه گانه به ندرت استفاده شده است و در واقع بیشتر کارها بر اساس سیکل رنگین آلی صورت گرفته است.
- آرایش جدیدی مدنظر قرار گرفته است.

فصل ۳ : مدل سازی سیستم

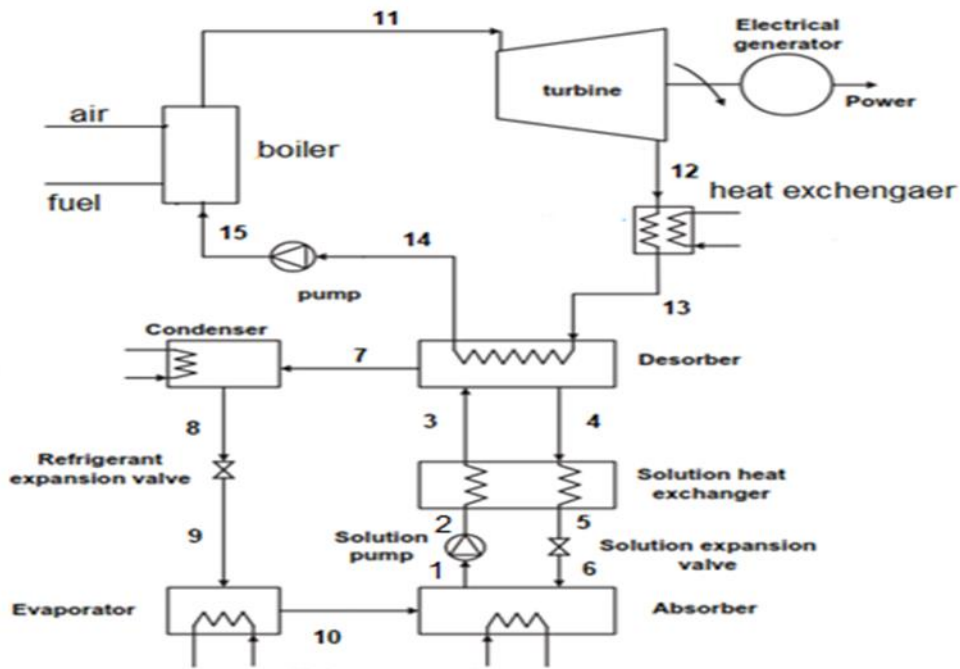
۳-۱ مقدمه

در این فصل به ارائه فرضیات مدل‌سازی و معادلات حاکم بر سیستم تولید همزمان سه‌گانه پرداخته می‌شود. بدین ترتیب ابتدا روابط حاکم و فرضیات به‌کاربرده شده در مورد مدل‌سازی توربین بخار ارائه می‌شود و روش حل معادلات بیان می‌گردد، سپس معادلات حاکم برای انجام تحلیل انرژی چیلر جذبی تک‌اثره استخراج شده و در انتها روابط راندمان انرژی، راندمان انرژی، درصد کاهش مصرف انرژی اولیه، درصد کاهش انتشار آلاینده‌گی و درصد کاهش هزینه‌های عملکرد سیستم تولید همزمان سه‌گانه نسبت به سیستم‌های مرسوم تولید جداگانه انرژی ارائه می‌شود.

۳-۲ طرح سیستم

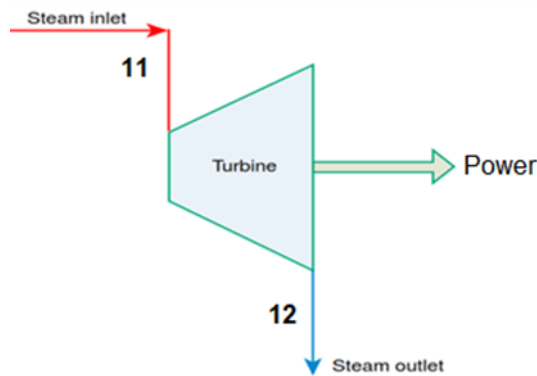
طرح کلی سیستم پیشنهادی تولید همزمان سه‌گانه (سرمایش، گرمایش و برق) با محرک اولیه توربین بخار در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. سیستم مورد بررسی متشکل از توربین بخار، چیلر جذبی تک‌اثره، سیستم بازیافت حرارت، بویلر، پمپ و ژنراتور برق است. که برای سیستم تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

- تجزیه و تحلیل سیستم تولید همزمان سه‌گانه در حالت پایا مورد بررسی قرار گرفته است.
- از افت فشار به جز در توربین، پمپ و شیرهای اختناق صرف نظر شده است.
- ظرفیت سرمایش ثابت در نظر گرفته شده است.



شکل (۱-۳): طرح کلی سیستم تولید همزمان سه گانه پیشنهادی

۳-۳ معادلات حاکم توربین بخار



شکل (۲-۳): شماتیکی از توربین بخار

طبق معادله بقای جرم، جرم ورودی و خروجی توربین بخار با هم برابر در نظر گرفته می شود [۵۷].

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} \quad (۱-۳)$$

با استفاده از معادله انرژی برای توربین بخار داریم [۵۷].

$$\dot{m}_{11}h_{11} = \dot{m}_{12}h_{12} + \dot{w}_T \quad (2-3)$$

راندمان ایزنتروپیک توربین بخار هم طبق معادله (3-3) محاسبه خواهد شد [57].

$$\eta_T = \frac{h_{11} - h_{12}}{h_{11} - h_{12,s}} = \frac{\dot{w}_{act}}{\dot{w}_{is}} \quad (3-3)$$

نسبت برگشت کار (BWR) هم مطابق معادله (3-4) محاسبه می‌شود [57].

$$BWR = \frac{W_p}{W_T} \quad (4-3)$$

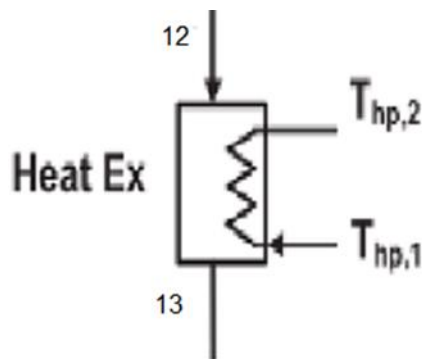
W_p کار انجام شده توسط پمپ هست. (PR) و (ER) به ترتیب نسبت فشار و نسبت انبساط از معادله‌های

(3-5) و (3-6) به دست می‌آیند [57].

$$PR = \frac{P_1}{P_2} \quad (5-3)$$

$$ER = \frac{v_2}{v_1} \quad (6-3)$$

۴-۳ معادلات حاکم مبدل حرارتی



شکل (3-3): شماتیکی از مبدل حرارتی

طبق معادله بقای جرم، جرم ورودی و خروجی مبدل حرارتی باهم برابر در نظر گرفته می‌شود.

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (7-3)$$

$$\dot{m}_{hp,1} = \dot{m}_{hp,2} \quad (8-3)$$

انتقال حرارت انجام شده در مبدل حرارتی توسط رابطه (۹-۳) به دست می آید.

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_{12}(h_{12} - h_{13}) \times \eta_{he} \quad (9-3)$$

۳-۵ معادلات حاکم بویلر

بر اساس قانون بقای جرم، جرم ورودی به بویلر با خروجی از بویلر برابر است.

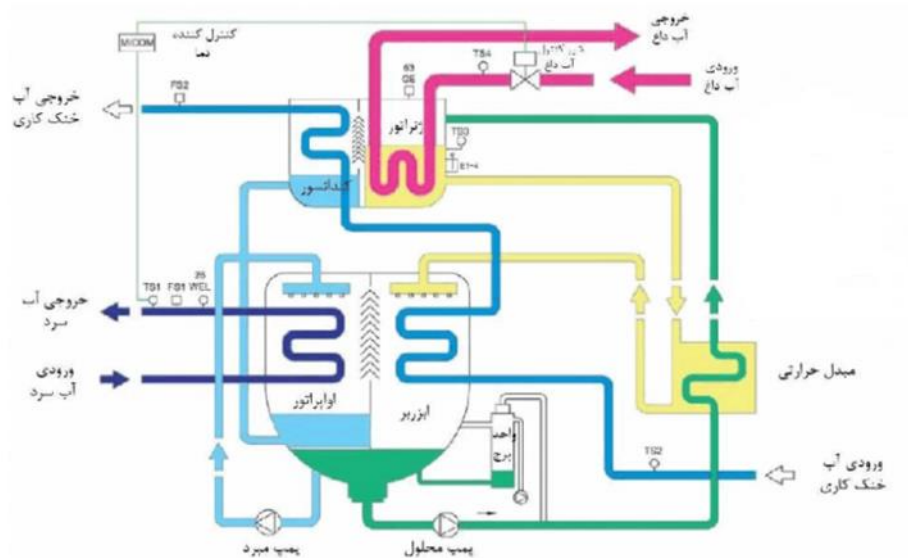
$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{11} \quad (10-3)$$

دبی سوخت مصرفی بویلر از رابطه (۱۱-۳) به دست می آید.

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{m}_S(h_{11} - h_{15})}{LHV \times \eta_{boiler}} \quad (11-3)$$

۳-۶ چیلر جذبی تک اثره

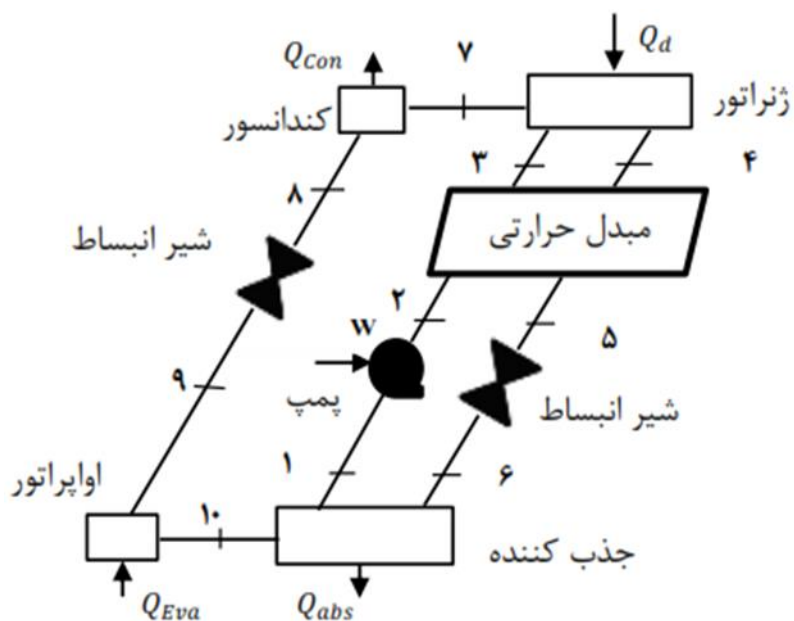
چیلر های جذبی دارای دو جزء مهم، ژنراتور و جذب کننده می باشند. که برخلاف چیلر های تراکمی که از انرژی برق به عنوان انرژی اولیه استفاده می کنند. چیلر های جذبی از گرمای اتلافی استفاده می کنند. به خاطر این که محرک در چیلر های جذبی گرمای اتلافی است این گرمای اتلافی به ژنراتور چیلر جذبی داده می شود. برای نمونه عملکرد یک چیلر جذبی تک اثره در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. چیلر های جذبی به دلیل آن که از گرمای اتلافی استفاده می کنند. پیشنهاد خوبی برای استفاده از گرمای اتلافی خواهند بود و یکی از کاربردهای چیلر جذبی استفاده در سیستم های تولید همزمان خواهد بود. در ادامه مدل سازی چیلر جذبی ارائه خواهد شد.



شکل (۳-۴): نحوه‌ی عملکرد چیلر جذبی

۳-۶-۱ تحلیل انرژی چیلر جذبی

چیلر جذبی تک اثره که در این جا استفاده شده، از آب به عنوان مبرد و از لیتیوم بروماید به عنوان جذب کننده استفاده شده است. با توجه به شکل (۳-۴) گرمای به ژنراتور چیلر جذبی داده می‌شود که ژنراتور چیلر جذبی شامل مخلوط آب و لیتیوم بروماید است. آبی که در ژنراتور چیلر تبخیر شده به کندانسور چیلر جذبی رفته و در کندانسور گرمای خود را از دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود و با عبور کردن از شیر انبساط فشار افت پیدا خواهد کرد سپس وارد اواپراتور می‌شود و گرمای لازم برای تبرید را به دست می‌آورد و وارد جذب کننده می‌شود. که با مخلوط شدن با لیتیوم- بروماید که فرایندی گرماده است گرمای خود را از دست خواهد داد. مخلوط لیتیوم- بروماید و آب به ژنراتور پمپ می‌شود. این روند مجدد برای سیکل چیلر جذبی تکرار می‌گردد. در آنالیز چیلر جذبی تمام بررسی‌ها با فرض شرایط پایا صورت گرفته است [۵۸].



شکل (۳-۵) : نحوه عملکرد چیلر جذبی تک اثره [۶]

در سیستم تولید همزمان مورد بررسی که در فصل بعدی به طور کامل توضیح داده خواهد شد از توربین بخار به عنوان محرک اولیه استفاده می شود. بدین ترتیب در سیکل چیلر جذبی حرارت اتلافی از مبدل حرارتی به ژنراتور رفته و حرارت خود را آنجا از دست می دهد که محرک اصلی سیکل تبرید جذبی هست.

روابط استفاده شده برای مبدل چیلر جذبی (۳-۱۲) تا (۳-۱۵) خواهند بود [۵۸].

$$Eff_{Hx} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} \quad (۳-۱۲)$$

$$C_{hot} = \dot{m}_4 \cdot \left[\frac{h_4 - h_5}{T_4 - T_5} \right] \quad (۳-۱۳)$$

$$C_{cold} = \dot{m}_2 \cdot \left[\frac{h_3 - h_2}{T_3 - T_2} \right] \quad (۳-۱۴)$$

$$Q_{hx} = \dot{m}_1 \cdot (h_3 - h_2) = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_5) \quad (۳-۱۵)$$

که در روابط (۱۲-۳) تا (۱۵-۳)، h انتالپی، Eff_{Hx} راندمان مبدل حرارتی و Q_{hx} گرمایی است که بین دو دبی جریان ورودی و خروجی ژنراتور چیلر جذبی تبادل می‌گردد. که روابط حاکم بر ژنراتور چیلر جذبی از رابطه (۱۶-۳) تا (۱۸-۳) آورده شده است [۵۸].

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7 \quad (۱۶-۳)$$

$$\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_4 x_4 \quad (۱۷-۳)$$

$$\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_7 h_7 + Q_d = 0 \quad (۱۸-۳)$$

در روابط (۱۶-۳) تا (۱۸-۳)، x غلظت و Q_d گرمایی است. که به ژنراتور وارد می‌گردد. معادلات حاکم بر کندانسور، اواپراتور و جذب‌کننده و در نهایت ضریب عملکرد چیلر جذبی به ترتیب در روابط (۱۹-۳) تا (۲۱-۳) آمده است [۵۸].

$$Q_{Con} = \dot{m}_7 (h_7 - h_8) \quad (۱۹-۳)$$

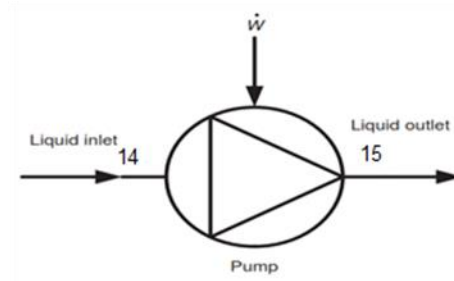
$$Q_{Eva} = \dot{m}_9 (h_{10} - h_9) \quad (۲۰-۳)$$

$$\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_6 h_6 - Q_{abs} - \dot{m}_1 h_1 = 0 \quad (۲۱-۳)$$

$$COP = \frac{Q_{Eva}}{Q_d} \quad (۲۲-۳)$$

در روابط (۱۹-۳) تا (۲۲-۳)، Q_{Con} ، Q_{Eva} ، Q_{abs} ، COP به ترتیب، حرارت دفع شده در کندانسور، حرارت جذب‌شده در اواپراتور جهت سرمایش، حرارت دفع شده در جذب‌کننده و ضریب عملکرد چیلر جذبی است. مدل‌سازی انرژی چیلر جذبی با داشتن حرارت اتلافی توربین بخار به کمک نرم‌افزار EES به خاطر داشتن کتابخانه‌های قوی شامل خواص ترمودینامیکی مواد انجام می‌گردد.

۷-۳ معادلات حاکم پمپ



شکل (۳-۶) : شماتیکی از پمپ

طبق معادله بقای جرم، جرم ورودی و خروجی پمپ باهم برابر در نظر گرفته می‌شود [۵۷].

$$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} \quad (۲۳-۳)$$

با استفاده از معادله انرژی برای پمپ داریم [۵۷].

$$\dot{m}_{14}h_{14} + \dot{w}_P = \dot{m}_{15}h_{15} \quad (۲۴-۳)$$

راندمان ایزنتروپیک پمپ هم طبق معادله (۲-۲۵) محاسبه خواهد شد [۵۷].

$$\eta_P = \frac{h_{15s} - h_{14}}{h_{15} - h_{14}} = \frac{w_{ps}}{w_p} \quad (۲۵-۳)$$

۸-۳ راندمان انرژی

راندمان کمیتی بدون بعد است و با نماد (η) نشان داده می‌شود. که در ترمودینامیک برای ارزیابی عملکرد سیستم‌ها به کار گرفته می‌شود و به صورت مقدار خالص انرژی تولیدی به مقدار کل انرژی ورودی تعریف می‌شود. مقدار راندمان هرچه بالاتر باشد نشان دهنده کارایی بهتر سیستم خواهد بود.

P_{El} توان الکتریکی سیستم تولید همزمان سه‌گانه بوده که از حاصل ضرب توان مکانیکی خروجی از توربین در راندمان ژنراتور برق (η_g) منهای کار پمپ حاصل می‌گردد. از کار پمپ چیلر جذبی تک اثره به دلیل کم بودن صرف نظر شده است. برای به دست آوردن راندمان الکتریکی سیستم از رابطه (۲۶-۳) استفاده می‌شود [۴۳].

$$\eta_{El} = \frac{P_{El}}{\dot{m}_F \cdot LHV} \quad (26-3)$$

برای به دست آوردن راندمان همزمان الکتریکی و گرمایش از رابطه (۲۷-۳) استفاده می‌کنیم [۴۳].

$$\eta_{Cog,h} = \frac{P_{El} + Q_h}{\dot{m}_F \cdot LHV} \quad (27-3)$$

برای به دست آوردن راندمان همزمان الکتریکی و سرمایش از رابطه (۲۸-۳) استفاده می‌کنیم [۴۳].

$$\eta_{Cog,c} = \frac{P_{El} + Q_{Eva}}{\dot{m}_F \cdot LHV} \quad (28-3)$$

برای به دست آوردن راندمان سیستم تولید همزمان سه‌گانه از رابطه (۲۹-۳) استفاده می‌کنیم [۴۳].

$$\eta_{Tri} = \frac{P_{El} + Q_{Eva} + Q_h}{\dot{m}_F \cdot LHV} \quad (29-3)$$

LHV و \dot{m}_F به ترتیب دبی جرمی و ارزش حرارتی گاز طبیعی برای تأمین منبع گرمایی موردنیاز سیستم تولید همزمان سه‌گانه است. η_{El} ، $\eta_{Cog,h}$ ، $\eta_{Cog,c}$ و η_{Tri} به ترتیب نشان‌گر راندمان الکتریکی، راندمان تولید همزمان گرمایش و برق، راندمان تولید همزمان سرمایش و برق و راندمان تولید همزمان سه‌گانه خواهند بود.

Q_h حرارت اتلافی از توربین بخار است. که جهت گرمایش، وارد سیستم بازیافت حرارت می‌شود. همچنین در این مطالعه فرض می‌گردد تمام انرژی حاصل از گاز طبیعی به حرارت موردنیاز بویلر تبدیل نمی‌گردد، بلکه در راندمان بویلر ضرب می‌شود. در نتیجه طبق رابطه (۳۰-۳) خواهیم داشت [۴۳].

$$Q_{CCHP} = \dot{m}_F \cdot LHV \cdot \eta_b \quad (30-3)$$

۹-۳ راندمان انرژی

راندمان انرژی الکتریکی، راندمان همزمان انرژی الکتریکی و گرمایش، راندمان انرژی همزمان الکتریکی و سرمایش و راندمان انرژی سیستم تولید همزمان سه گانه به ترتیب از روابط (۳-۳۱) تا (۳-۳۴) به دست می‌آیند [۴۳].

$$\eta_{ex,el} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{x_f}} \quad (3-31)$$

$$\eta_{ex,cog,h} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{heat}}\right) \dot{Q}_h}{\dot{E}_{x_f}} \quad (3-32)$$

$$\eta_{ex,cog,c} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cool}}\right) \dot{Q}_{eva}}{\dot{E}_{x_f}} \quad (3-33)$$

$$\eta_{ex,tri} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cool}}\right) \dot{Q}_{eva} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{heat}}\right) \dot{Q}_h}{\dot{E}_{x_f}} \quad (3-34)$$

در این روابط (۳-۳۱) تا (۳-۳۴)، T_0 دمای محیط، T_{cool} دمای لازم برای سرمایش، T_{heat} دمای میانگین که برای گرمایش استفاده می‌شود. و \dot{E}_{x_f} نرخ انرژی سوخت است و از رابطه (۳-۳۵) به دست می‌آید [۵۹].

$$\dot{E}_{x_f} = \dot{m}_F \cdot ex_f \quad (3-35)$$

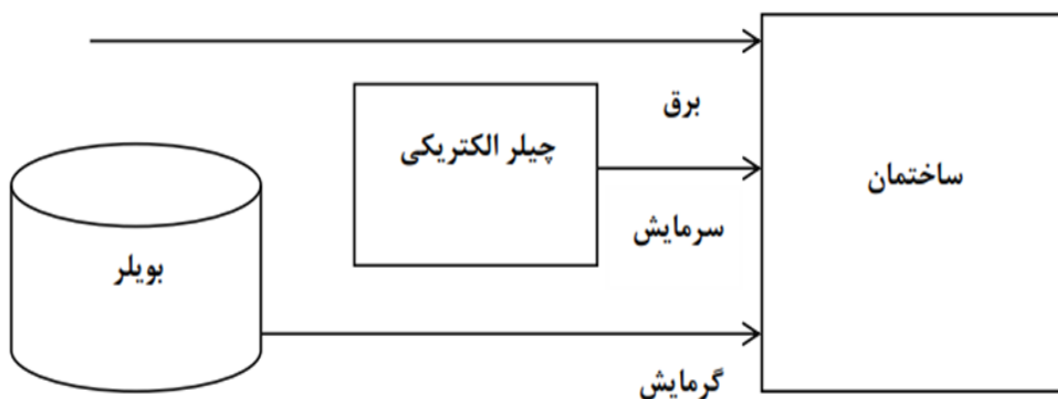
در رابطه (۳-۳۵)، ex_f انرژی ویژه سوخت است که از رابطه (۳-۳۶) به دست می‌آید [۵۹].

$$ex_f = \varphi \cdot LHV \quad (3-36)$$

در رابطه (۳-۳۶)، φ در واقع نسبت انرژی شیمیایی سوخت به ارزش حرارتی سوخت می‌باشد. که برای سوخت گاز طبیعی، φ را ۱/۰۴ در نظر می‌گیریم [۵۹].

۳-۱۰ تحلیل انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی

برای آن که ما ارزیابی از عملکرد سیستم تولید همزمان سه‌گانه داشته باشیم. سیستم تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی را از لحاظ انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی در مقایسه با سیستم‌های تولید جداگانه مرسوم مورد مقایسه قرار می‌دهیم و به همین دلیل از روابط میزان درصد کاهش مصرف انرژی اولیه، درصد کاهش انتشار آلاینده‌ی دی‌اکسیدکربن و درصد کاهش هزینه‌های عملکردی استفاده می‌کنیم. برای درک بهتر ابتدا نمایی از سیستم تولید مجزا رایج در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. در این مطالعه سوخت مصرفی که توسط منبع حرارتی برای سیستم مجزا و سیستم تولید همزمان سه‌گانه مورد استفاده قرار می‌گیرد گاز طبیعی می‌باشد.



شکل (۳-۷) : سیستم تولید جداگانه انرژی برای مکان مورد نظر [۶]

در این تحقیق، تحلیل بر این اساس است که سیستم تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی در ظرفیت نامی خود قادر به توانایی تأمین نیازهای گرمایشی، سرمایشی و الکتریکی خود باشد و نیاز به خرید برق و گاز اضافی از شبکه نباشد.

۳-۱۰-۱ درصد کاهش مصرف انرژی اولیه

برای آن که ما بتوانیم در صد کاهش مصرف انرژی اولیه را محاسبه کنیم ابتدا میزان انرژی مصرفی توسط سیستم تولید جداگانه را از رابطه (۳۷-۳) و مقدار انرژی مصرف شده توسط سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی را از رابطه (۳۸-۳) برای همان میزان انرژی موردنیاز محاسبه می‌کنیم [۶۰].

$$F_{SP} = \frac{P_{EL}}{\eta_e^{sp}} + \frac{Q_h}{\eta_t^{sp}} + \frac{Q_{eva}}{\eta_e^{sp} COP_{EL}^{SP}} \quad (37-3)$$

$$F_{CCHP} = \dot{m}_F \times LHV \times \eta_b \quad (38-3)$$

F_{SP} و F_{CCHP} به ترتیب میزان انرژی سوخت مصرفی برحسب کیلوژول بر ثانیه برای سیستم تولید همزمان سه‌گانه و سیستم تولید جداگانه می‌باشند. η_e^{sp} ، η_t^{sp} و COP_{EL}^{SP} به ترتیب راندمان حرارتی نیروگاه برق، راندمان بویلر و ضریب عملکرد چیلر الکتریکی مورد استفاده در سیستم تولید جداگانه می‌باشند.

در نهایت میزان در صد کاهش مصرف انرژی اولیه در سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه نسبت به سیستم‌های تولید جداگانه رایج طبق رابطه (۳۹-۳) محاسبه می‌شود [۶۰].

$$TPES = \left(\frac{F_{SP} - F_{CCHP}}{F_{SP}} \right) \times 100 \quad (39-3)$$

۳-۱۰-۲ در صد کاهش میزان آلاینده‌گی

برای آن که در صد کاهش گازهای گلخانه‌ای و در واقع کاهش میزان آلاینده‌گی را در سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی در مقایسه با سیستم تولید مجزا رایج مورد محاسبه قرار دهیم. ابتدا مقدار جرم دی اکسید کربن منتشر شده توسط سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی را از رابطه (۴۰-۳) و مقدار جرم دی اکسید کربن منتشر شده توسط سیستم‌های مجزا، برای تأمین همان مقدار انرژی را از رابطه (۴۱-۳) محاسبه می‌کنیم [۶۰].

$$mCO_2^{cchp} = \mu CO_2^F F_{CCHP} \quad (40-3)$$

$$mCO_2^{SP} = \mu CO_2^W (P_{EL}) + \frac{\mu CO_2^F Q_h}{\eta_t^{sp}} + \frac{\mu CO_2^W Q_{eva}}{COP_{EL}^{SP}} \quad (41-3)$$

m

mCO_2^{cchp} و mCO_2^{SP} به ترتیب جرم دی اکسیدکربن منتشرشده توسط سیستم تولید جداگانه و سیستم تولید همزمان هستند. که μCO_2^W و μCO_2^F به ترتیب شاخص انتشار آلاینده دی اکسیدکربن برای گاز طبیعی و برق شبکه می باشند. که این مقادیر با توجه به محرک اولیه و نوع سوخت مورد استفاده شده مشخص می گردد و این مقادیر برای کار حاضر در جدول (4-4) ذکر شده است.

در نهایت میزان در صد کاهش انتشار آلاینده دی اکسیدکربن در سیستم تولید همزمان سه گانه در مقایسه با سیستم تولید جداگانه به صورت (3-42) محاسبه می گردد [60].

$$TCO_2ER = \left(\frac{mCO_2^{SP} - mCO_2^{cchp}}{mCO_2^{SP}} \right) \times 100 \quad (42-3)$$

۳-۱۰-۳ درصد کاهش هزینه های عملکرد

هزینه های عملکردی در سیستم تولید همزمان سه گانه پیشنهادی و سیستم تولید مجزا شامل خرید برق و سوخت از شبکه می باشد. که جهت محاسبه این هزینه ها برای تأمین انرژی ورودی یکسان ابتدا برای سیستم تولید همزمان سه گانه پیشنهادی از رابطه (3-43) و محاسبه این هزینه ها برای سیستم مجزا از رابطه (3-44) استفاده می شود [60].

$$COST^{CCHP} = COST_F \times F_{CCHP} \quad (43-3)$$

$$COST^{SP} = (COST_W \times P_{EL}) + \left(\frac{COST_F \times Q_h}{\eta_t^{sp}} \right) + \left(\frac{COST_W Q_{eva}}{COP_{EL}^{SP}} \right) \quad (44-3)$$

در روابط (۳-۴۳) و (۳-۴۴)، $COST_W$ و $COST_F$ به ترتیب نشان‌دهنده تعرفه جهانی خرید برق و گاز طبیعی از شبکه برای مکان موردنظر است. در نهایت برای محاسبه درصد کاهش هزینه‌های عملکردی سیستم تولید همزمان سه‌گانه نسبت به سیستم تولید جداگانه از رابطه (۳-۴۵)، استفاده می‌کنیم [۶۰].

$$CR = \left(\frac{COST^{SP} - COST^{CCHP}}{COST^{SP}} \right) \times 100 \quad (۳-۴۵)$$

۳-۱۱ ارزش خالص هزینه‌های اولیه

ارزش خالص هزینه‌های اولیه که به اختصار با NPWC نشان داده می‌شود. برابر مجموع هزینه‌های خرید تک تک تجهیزات بوده و از رابطه (۳-۴۶) قابل محاسبه خواهد بود [۵۹].

$$NPWC = \sum_{j=1}^n (\beta \times NC) \quad (۳-۴۶)$$

در رابطه (۳-۴۶)، β هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بر واحد ظرفیت هر یک از تجهیزات است، NC ظرفیت نامی هر یک از تجهیزات و β نیز شمارنده تجهیزات است. برای آن که ما بتوانیم هزینه احداث تجهیزات و در واقع ارزش خالص هزینه‌های اولیه رو به سالیانه تبدیل کنیم. از رابطه (۳-۴۷) استفاده می‌کنیم [۵۹].

$$R = CRF \times NPWC \quad (۳-۴۷)$$

CRF ضریب سالیانه کننده می‌باشد که به دو پارامتر نرخ بهره i و طول عمر سیستم n بستگی دارد، که از رابطه (۳-۴۸) حساب می‌شود [۵۹].

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۳-۴۸)$$

SV هزینه سالیانه اسقاط است و از رابطه (۳-۴۹) به دست می‌آید [۵۹].

$$SV = 0.2 \times NPWC \quad (۳-۴۹)$$

برای محاسبه هزینه‌های سالیانه یکنواخت با توجه به این که هزینه اسقاط و هزینه اولیه در نظر گرفته شده باشد. می‌توان از رابطه (۳-۵۰) استفاده نمود [۵۹].

$$EUAC = R - SV \quad (50-3)$$

ارزش فعلی درآمدها را با NPWB نشان می دهند که برای محاسبه ارزش فعلی درآمدها که شامل درآمد سالیانه سیستم و درآمدی که، از اسقاط تجهیزات به دست خواهد آمد، می شود می توان از رابطه زیر استفاده کرد [59-60].

$$NPWB = A \times \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] + SV \times \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (51-3)$$

$$A = (COST^{SP} - COST^{CCHP})_{Annual} - (cost^{service, cchp}) \quad (52-3)$$

۳-۱۲ دوره بازگشت سرمایه

کسانی که در مباحث انرژی و سیستم های تولید همزمان سرمایه گذاری می کنند، تمایل دارند از مدت زمان بازگشت سرمایه اطلاع داشته باشند و مشتاق به سرمایه گذاری در پروژه هایی هستند که کمترین دوره بازگشت سرمایه را داشته باشند. دوره بازگشت سرمایه به دو روش قابل محاسبه خواهد بود که در ادامه ذکر شده است.

۳-۱۲-۱ محاسبه بازگشت سرمایه به روش سنتی

یکی از روش های محاسبه بازگشت سرمایه، محاسبه بازگشت سرمایه به روش سنتی است که روشی سریع و تقریبی است. در روش محاسبه بازگشت سرمایه به روش سنتی مدت زمان بازگشت سرمایه با درآمدهای سالیانه تعیین می شود. که از رابطه (2-53) به دست می آید [59].

$$-C + \sum_{n=1}^{PB} CF_n = 0 \quad (53-3)$$

CF_n و C به ترتیب هزینه اولیه و فرایند مالی سیستم در پایان سال n ام است. هزینه های اولیه که برابر مجموع هزینه های سرمایه گذاری برای تک تک تجهیزات می باشد و فرایند های مالی سیستم که شامل کلیه هزینه های صرفه جویی در مصرف سوخت و کلیه هزینه های سیستم و در بعضی از موارد درآمد

های ناشی از فروش برق به شبکه خواهد بود. اگر درآمد هابه گونه ای باشد که در پایان هر سال برابر شوند در این صورت دوره بازگشت سرمایه از رابطه (۳-۵۴) به دست می آید [۵۹].

$$PB = \frac{C}{CF} \quad (۳-۵۴)$$

۳-۱۲-۲ محاسبه به روش کلاسیک

در محاسبه بازگشت سرمایه به روش کلاسیک نتایجی که از این روش به دست خواهند آمد در مقایسه با روش محاسبه بازگشت سرمایه به روش سنتی، دقیق تر بوده و به عنوان روشی دقیق تر معرفی می شود. دلیل این دقیق بودن این روش در آن است که در این روش ارزش زمانی پول و هزینه های اسقاط تجهیزات در نظر گرفته می شود. در واقع در این روش مدت زمان بازگشت سرمایه زمانی خواهد بود که ارزش خالص درآمدها با هزینه های اولیه در پایان آن سال با هم برابر شوند. برای محاسبه بازگشت سرمایه به روش کلاسیک از رابطه (۳-۵۵) استفاده می کنیم [۵۹].

$$\begin{aligned} NPWC(n) - NPWB(n) &= 0 \\ PB &= n \end{aligned} \quad (۳-۵۵)$$

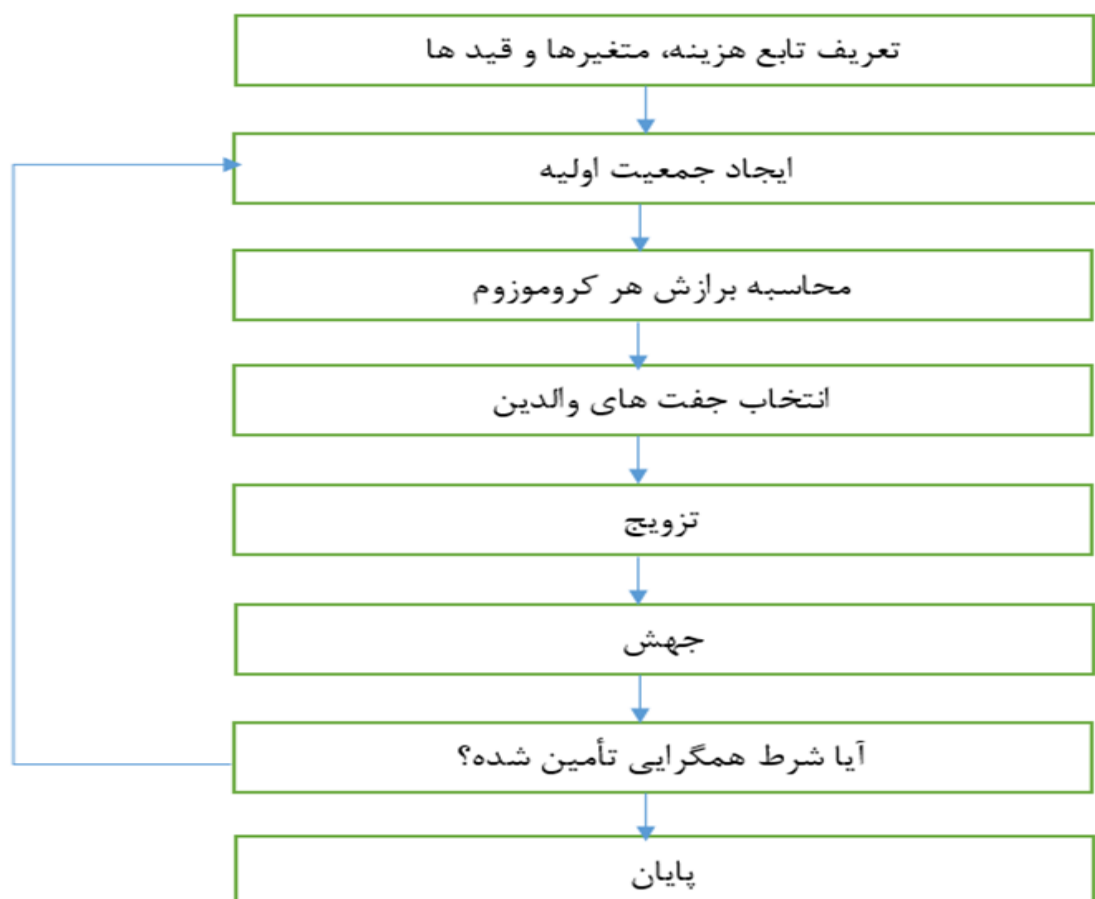
۳-۱۳ روش بهینه سازی

الگوریتم ژنتیک که در رابطه با روش بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است، توسط Jhon Holland در سال ۱۹۶۰ توسعه داده شده است. دلیل انتخاب ما برای استفاده از الگوریتم ژنتیک مزیت این الگوریتم است که به شرح زیر خلاصه می شود.

- الگوریتم ژنتیک نیازی به اطلاعاتی در مورد مشتق تابع ندارد.
- این الگوریتم قابلیت کار با تعدادی زیادی متغیر را دارد.
- بهینه سازی توابع هدف پیچیده را می توان با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام داد.
- برای شروع به جای استفاده از یک مقدار واحد از جمعیتی از جواب های بالقوه استفاده می کند.

- قابلیت بهینه سازی در فضاهای پیوسته یا گسسته را دارد.

نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک هم به این صورت خواهد بود که در ابتدا یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها را تشکیل داده‌اند. که برای آن که این کروموزوم‌ها را ارزیابی کنیم از تابع هدف استفاده می‌کنیم. در الگوریتم ژنتیک مقدار عددی تابع هدف محاسبه شده، معیار مقایسه و انتخاب کروموزوم برتر خواهد بود. در الگوریتم ژنتیک، کروموزوم های برتر نقش والدینی را ایفا می‌کنند که با اعمال تزویج بر آنها، کروموزوم های جدید با ترکیبی از خواص دو کروموزوم والد تولید می‌شوند. عمل دیگری که در این الگوریتم کاربرد دارد، عملگر جهش است که به طور تصادفی مقادیر یک یا چند ژن را در یک کروموزوم تغییر می‌دهد. این عمل تا رسیدن به جواب بهینه در الگوریتم ادامه پیدا می‌کند. فلو چارت الگوریتم ژنتیک در شکل (۳-۸) نشان داده شده است.



شکل (۳-۸) فلوچارت الگوریتم ژنتیک

فصل ۴ : نتیجہ و بحث

۴-۱ مقدمه

در فصل سوم به ارائه فرضیات مدل‌سازی و معادلات حاکم بر سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه توربین بخار پرداخته شد. در این فصل ابتدا معتبرسازی چیلر تک اثره و سپس معتبرسازی توربین بخار انجام می‌شود و در ادامه به مدل‌سازی سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه توربین بخار پرداخته می‌شود. سیستم پیشنهادی از دیدگاه انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی بررسی شده و همچنین نسبت به سیستم‌های مرسوم تولید جداگانه انرژی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج بهینه‌سازی به ازای متغیرهای دما و فشار ورودی به توربین بخار بررسی و نتایج آورده شده است.

۴-۲ اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی سیکل جذبی

تک‌اثره

جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی سیکل چیلر جذبی تک‌اثره از نتایج کوشیک و آروا [۶۱] استفاده شده است. جدول (۴-۱) به مقایسه نتایج حاصل از پژوهش حاضر و مطالعه کوشیک و آروا می‌پردازد.

جدول (۴-۱): اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی چیلر جذبی تک‌اثره

جزء مورد بررسی	نمایه	جریان انرژی (kW)	تفاوت (%)
ژنراتور	Q_{gen}	۳۰۹۵/۷۰	۰/۰۲
ابزوربر	Q_{abs}	۲۹۴۵/۲۷	۰/۹۹
کندانسور	Q_{cond}	۲۵۰۵/۹۱	۱/۲۹
اواپراتور	Q_{eva}	۲۳۵۵/۴۵	۲/۶
ضریب عملکرد	cop	۰/۷۶۰۹	۲/۶

۳-۴ اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی توربین بخار

جهت اعتبار سنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی توربین بخار از نتایج شبیر و میرزایان [۶۲] استفاده شده است. جدول (۲-۳) به مقایسه نتایج حاصل از پژوهش حاضر و مطالعه شبیر و میرزایان می‌پردازد. در این جدول از داده‌های ورودی به شرح زیر استفاده شده است.

$$T_{11} = 300^{\circ}\text{C}, P_{11} = 3300\text{kPa}, P_{12} = 1000\text{kPa}$$

جدول (۲-۴): اعتبارسنجی شبیه‌سازی ترمودینامیکی توربین بخار

تفاوت (%)	پژوهش حاضر	[۶۲]	نمایه	جزء مورد بررسی توربین بخار
۰/۰۴	۱۷۹/۹۲	۱۸۰	T_{12}	دمای خروجی $^{\circ}\text{C}$
۰/۰۳۵	۲۷۶۷/۹۰	۲۷۶۹/۸۷	h_{12}	آنتالپی خروجی $(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$
۰/۰۵۴	۱۸۰۱	۱۸۰۰/۰۲	W_{st}	توان خروجی (kW)
۰/۰۷۱۰	۲۷۳۰	۲۷۳۱/۹۴	h_{12s}	آنتالپی ایزنتروپیک خروجی $(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$

۴-۴ مدل‌سازی حرارتی سیستم

توربین بخار به‌عنوان محرک اولیه سیستم تولید همزمان سه‌گانه استفاده شده است. در جدول (۳-۴) شرایط عملکردی توربین بخار آورده شده است.

جدول (۳-۴): شرایط عملکردی توربین بخار

مقدار	پارامترهای عملکردی
300°C	دمای ورودی
179.92°C	دمای خروجی
3300 kPa	فشار ورودی
1000 kPa	فشار خروجی
۳/۳	نسبت فشار

در جدول (۴-۴) پارامترهای مورد نیاز برای انجام تحلیل انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی سیستم تولید همزمان سه‌گانه آورده شده است. منبع حرارتی سیستم تولید همزمان سه‌گانه و سیستم تولید جداگانه از سوختن گاز طبیعی تأمین می‌گردد.

جدول (۴-۴): پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی

پارامتر	مقدار	واحد
راندمان حرارتی نیروگاه سنتی (η_{El}^{SP}) [۶۰]	٪۳۰	(-)
راندمان بویلر (η_t^{SP}) [۶۰]	٪۸۰	(-)
ضریب عملکرد چیلر الکتریکی (COP_{El}^{SP}) [۶۰]	۳	(-)
راندمان ژنراتور برق (η_g) [۶۲]	٪۹۷	(-)
شاخص انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن برای گاز طبیعی (μCO_2^F) [۶۳]	۱۷۰/۶۵	(g/kWh)
شاخص انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن برای برق شبکه (μCO_2^W) [۶۳]	۷۰۵/۵۵	(g/kWh)
تعرفه جهانی خرید گاز طبیعی از شبکه ($cost_F$) [۶۴]	۰/۰۲	(\$/ kWh)
تعرفه جهانی خرید برق از شبکه ($cost_W$) [۶۴]	۰/۱	(\$/ kWh)
ارزش حرارتی گاز طبیعی (LHV) [۶۲]	۴۶۲۵۰	($kJkg^{-1}$)

در جدول (۴-۵) پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی انرژی چیلر جذبی تک اثره مشخص شده است. همچنین نتایج ناشی از مدل‌سازی انرژی چیلر جذبی در نرم‌افزار EES در جدول (۴-۵) و (۴-۶) به‌طور کامل ارائه شده است [۶۵]. در جدول (۴-۶) اطلاعات ترمودینامیکی هر نقطه از سیکل جذبی با توجه به شماره‌گذاری شکل (۴-۳) قابل مشاهده است. همچنین در جدول (۴-۶) نیز اطلاعات ناشی از مدل‌سازی کلی سیکل جذبی و سیستم تولید همزمان ارائه شده است.

جدول (۴-۵): پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی

پارامتر	مقدار	واحد
فشار بالای سیکل جذبی	۶/۵۵۰	kPa
فشار پایین سیکل جذبی	۱/۰۱۶	kPa
دمای ژنراتور سیکل جذبی	۹۰	$^{\circ}C$
دبی جرمی ورودی به پمپ	۸/۰۳۳	kg/s
حرارت ورودی به ژنراتور چیلر جذبی	۵۹۹۸/۸۹۲	kW

جدول (۴-۶) : نتایج ناشی از مدل سازی ترمودینامیکی چیلر جذبی و سیستم تولید همزمان

نقطه سیکل	دما [°C]	دبی جرمی [kgs ⁻¹]	فشار [kPa]	انتالی [kJkg ⁻¹]
۱	۲۳/۱۴	۸/۰۳۳۰	۱/۰۱۶	۴۱/۶۹
۲	۲۳/۱۴	۸/۰۳۳۰	۶/۵۵۰	۴۱/۷۰
۳	۵۱/۰۶	۸/۰۳۳۰	۶/۵۵۰	۱۰۴/۷۳
۴	۹۰	۵/۹۲۷۶	۶/۵۵۰	۲۲۸/۶۰
۵	۴۳/۲۰	۵/۹۲۷۶	۶/۵۵۰	۱۴۳/۱۸
۶	۵۲/۶۴	۵/۹۲۷۶	۱/۰۱۶	۱۴۳/۱۸
۷	۵۶/۶۷	۲/۱۰۵۴	۶/۵۵۰	۲۶۰۵/۲۲
۸	۳۷/۷۸	۲/۱۰۵۴	۶/۵۵۰	۱۵۸/۲۰
۹	۷/۲۰	۲/۱۰۵۴	۱/۰۱۶	۱۵۸/۲۰
۱۰	۷/۲۰	۲/۱۰۵۴	۱/۰۱۶	۲۵۱۳/۷۵
۱۱	۳۰۰	۸/۶۳	۳۳۰۰	۲۹۸۳/۰۱
۱۲	۱۷۹/۹۲	۸/۶۳	۱۰۰۰	۲۷۶۷/۹۰
۱۳	۱۷۹/۹۲	۸/۶۳	۱۰۰۰	۱۴۵۸
۱۴	۱۷۹/۹۲	۸/۶۳	۱۰۰۰	۷۶۲/۸۸
۱۵	۱۸۰/۳۱	۸/۶۳	۳۳۰۰	۷۶۵/۷۵

در جدول (۴-۷) نتایج مدل سازی سیستم تولید همزمان سه گانه آورده شده است.

جدول (۴-۷) : نتایج مدل سازی سیستم تولید همزمان سه گانه

پارامتر	مقدار	واحد
توان الکتریکی (P_{EL})	۱۷۷۶	kW
توان گرمایشی (Q_h)	۹۰۴۴	kW
توان سرمایشی (Q_{Eva})	۴۹۵۹/۴۸۹	kW
راندمان الکتریکی (η_{EL})	۹/۲۸۱	%
راندمان الکتریکی و گرمایشی ($\eta_{cog,h}$)	۵۶/۵۴	%
راندمان الکتریکی و سرمایشی ($\eta_{cog,c}$)	۳۵/۲	%
راندمان تولید همزمان سه گانه (η_{CCHP})	۸۲/۴۶	%
درصد کاهش مصرف انرژی اولیه (TPES)	۱۵/۸۳	%
درصد کاهش انتشار آلاینده دی اکسید کربن (TCO_2ER)	۲۴/۹۱	%
درصد کاهش هزینه های عملکرد (CR)	۳۵/۳۴	%

هزینه اولیه و تعمیر و نگهداری اجزای سیستم تولید همزمان در جدول (۴-۸) آمده است.

جدول (۴-۸): هزینه های سرمایه گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری سیستم تولید همزمان سه گانه [۶۰ و ۶۲ و ۶۶ و ۶۷ و ۶۸]

تجهیزات	هزینه تعمیر و نگهداری ($\frac{\$}{kWh}$)	هزینه سرمایه گذاری اولیه ($\frac{\$}{kW}$)
توربین بخار	۰/۰۰۸	$6000 \cdot (\dot{W}_{net})^{0.7}$
مبدل حرارتی	۰/۰۰۳	۳۰
چیلر جذبی	۰/۰۰۱	۱۶۰
پمپ	۰/۰۱	$3540 \cdot (\dot{W}_P)^{0.71}$
بویلر	۰/۰۰۲۷	۵۰

۴-۵ بهینه سازی

در این بخش به کمینه کردن هزینه سالیانه سیستم تولید همزمان پرداخته خواهد شد. تابع هدف این بهینه سازی مجموع هزینه های سالیانه می باشد. دما و فشار ورودی به توربین بخار، راندمان ایزنتروپیک توربین بخار و راندمان مبدل حرارتی به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته خواهد شد.

Minimize $Cost_{total}$

Subject to :

$$300 \leq T_{11} \leq 400$$

$$3300 \leq P_{11} \leq 6000$$

$$0.8 \leq \eta_{heat\ exchanger} \leq 1$$

$$0.85 \leq \eta_{turbine} \leq 0.95$$

نتایج بهینه سازی سیستم تولید همزمان با محرک اولیه توربین بخار در جدول (۴-۹) ذکر شده است.

نتایج گرفته شده بر اساس متغیرهایی تصمیم که ذکر شده صورت گرفته است. در این بهینه سازی

تعداد نسل ها (جمعیت) ۲۵۶ بوده و بهترین نسل ۲۲۰ شده است.

جدول (۴-۹): نتایج بهینه‌سازی سیستم تولید همزمان

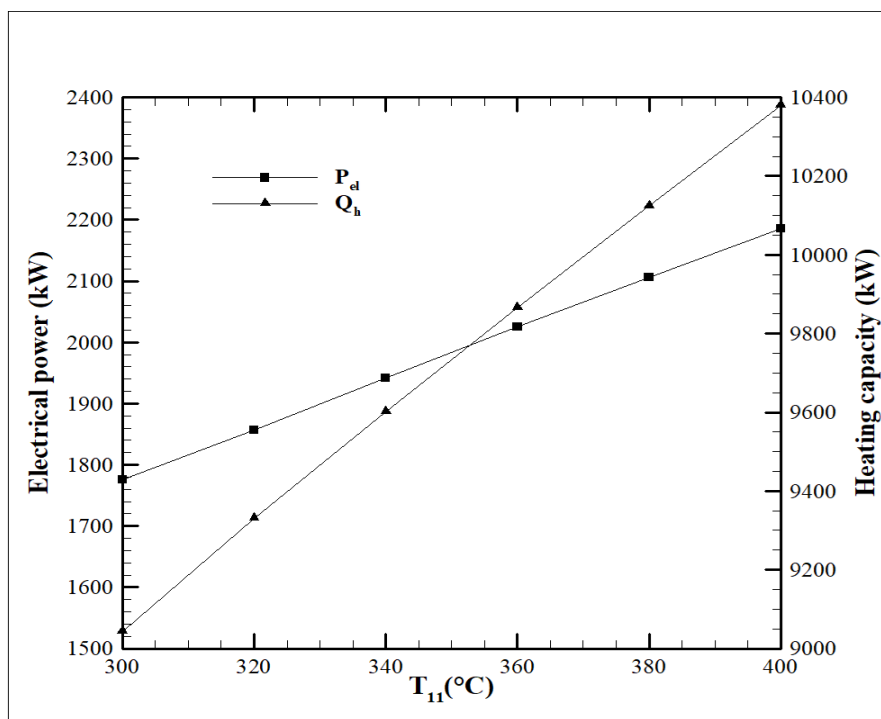
پارامتر	نمایه	نتایج سیستم تولید همزمان در حالت مرجع	نتایج سیستم تولید همزمان در حالت بهینه	واحد
دمای ورودی توربین بخار	T_{11}	۳۰۰	۴۰۰	°C
فشار ورودی توربین بخار	P_{11}	۳۳۰۰	۶۰۰۰	kPa
راندمان ایزنتروپیک توربین بخار	$\eta_{turbine}$	۰/۸۵	۰/۹۵	%
راندمان مبدل حرارتی	$\eta_{heat\ exchanger}$	۰/۸	۱	%
توان الکتریکی	P_{el}	۱۷۷۶	۳۳۱۵	kW
توان گرمایشی	Q_h	۹۰۴۴	۱۱۳۹۲	kW
توان سرمایشی	Q_{ev}	۴۹۵۹/۴۸۹	۴۹۵۹/۴۸۹	kW
راندمان الکتریکی	η_{el}	۹/۲۸۱	۱۵/۹۳	%
راندمان همزمان الکتریکی و سرمایش	$\eta_{cog,c}$	۳۵/۲	۳۹/۷۶	%
راندمان همزمان الکتریکی و گرمایش	$\eta_{cog,h}$	۵۶/۵۴	۷۰/۶۸	%
راندمان سیستم تولید همزمان سه‌گانه	η_{tri}	۸۲/۴۶	۹۴/۵۱	%
ضریب عملکرد چیلر	COP	۰/۸۲۷	۰/۸۲۷	—

درصد کاهش هزینه‌های عملکردی	CR	۳۵/۳۴	۴۶/۷۵	%
درصد کاهش مصرف انرژی اولیه	$TPES$	۱۵/۸۳	۳۲/۴۴	%
درصد کاهش انتشار دی‌اکسید کربن	TCO_2ER	۲۴/۹۱	۴۰/۱۷	%
هزینه‌های کلی سالیانه	$Cost_{total}$	۲۳۳۳۰۰۰	۱۹۳۲۰۰۰	\$

۴-۶ نتایج کلی

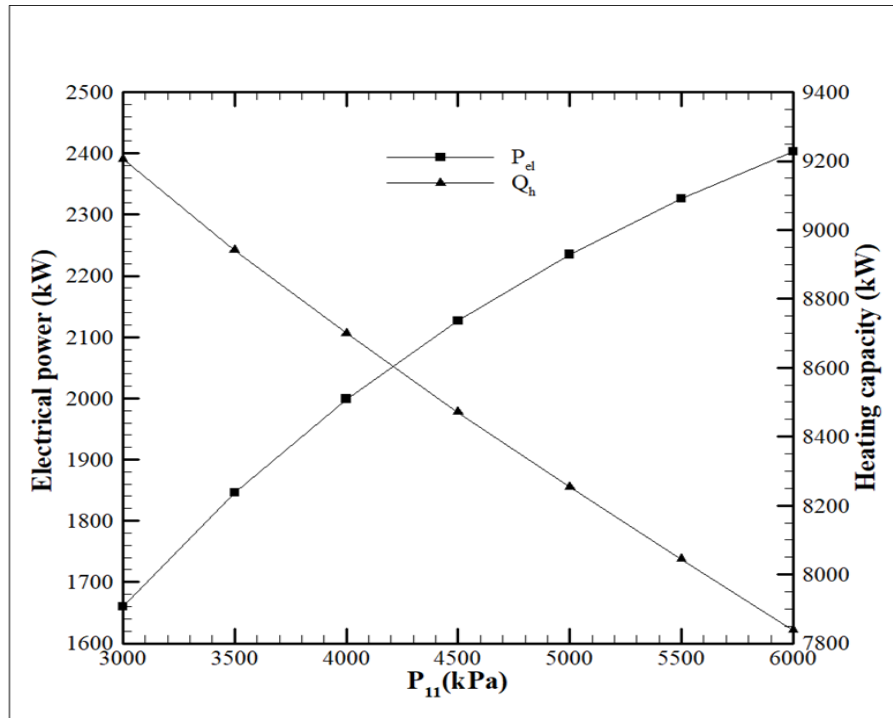
در این قسمت نتایج تاثیرات تغییرات دما و فشار ورودی توربین بر توان الکتریکی، ظرفیت گرمایشی، راندمان انرژی، راندمان انرژی، مصرف سوخت، درصد کاهش آلایندگی، درصد کاهش مصرف انرژی اولیه، درصد کاهش هزینه‌های عملکردی و دوره بازگشت سرمایه ذکر شده است و همچنین نتایج عملکرد چیلر جذبی نیز تحت شرایطی مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه ذکر شده است.

در شکل (۴-۱) تأثیر افزایش دما و ورودی توربین بخار بر توان الکتریکی، ظرفیت گرمایشی قابل مشاهده است. که با افزایش دمای ورودی به توربین بخار، توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی به علت افزایش انرژی ورودی به سیستم تولید همزمان سه‌گانه افزایش خواهد یافت. از دلایل دیگر می‌توان به اختلاف آنتالپی که بین ورودی و خروجی توربین و مبدل حرارتی افزایش پیدا کرده اشاره کرد. ظرفیت گرمایشی نیز با فرض استفاده حداکثری از ظرفیت چیلر جذبی تک اثره مقداری ثابت که برابر $4959/489 \text{ kW}$ است.



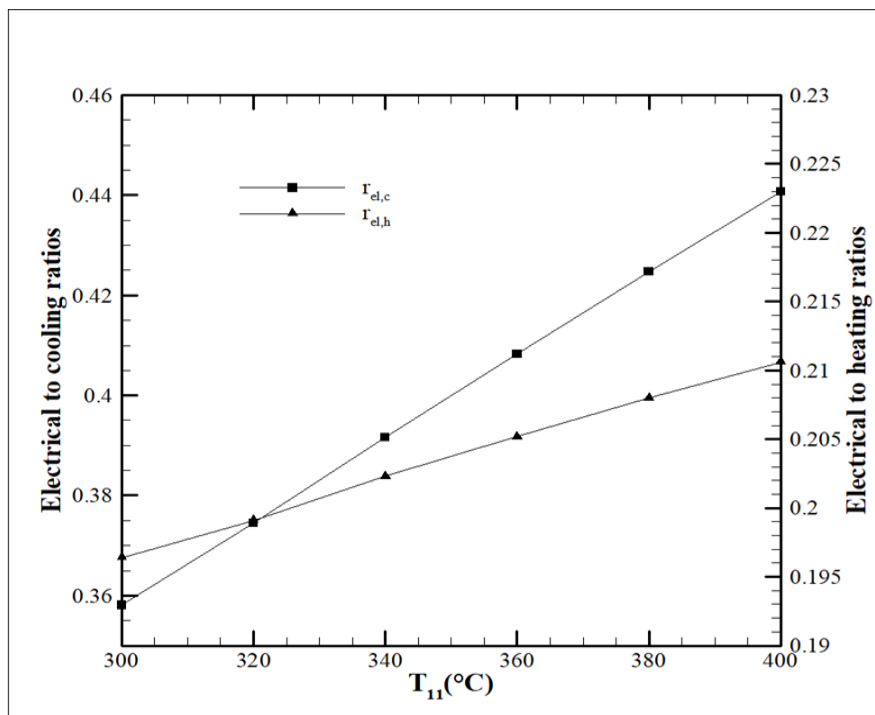
شکل (۴-۱): تأثیر دمای ورودی به توربین بخار در فشار 3300 kPa بر توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی

در شکل (۴-۲) تأثیر تغییرات فشار ورودی بر توربین بر توان الکتریکی، ظرفیت گرمایشی قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می کنید توان الکتریکی افزایش می یابد به علت افزایش آنتالپی ورودی و خروجی به توربین و ظرفیت گرمایشی به علت کاهش آنتالپی ورودی و خروجی به مبدل حرارتی کاهش می یابد. در واقع با افزایش فشار ورودی به توربین بخار که ناشی از افزایش فشار پمپ است. انرژی ورودی با کاهش مصرف سوخت کاهش خواهد یافت و باعث کاهش آنتالپی خواهد شد.



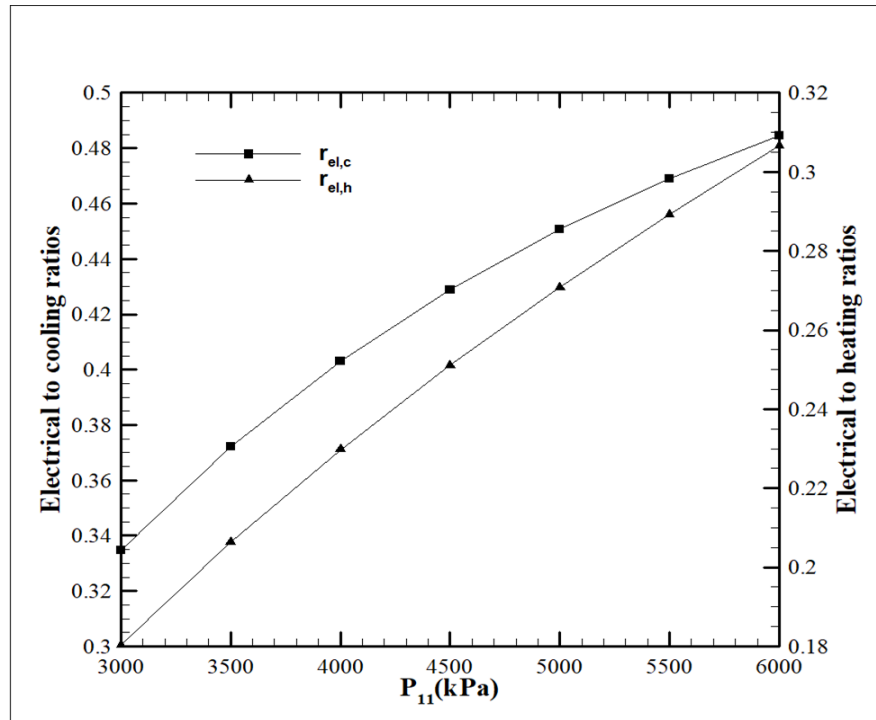
شکل (۴-۲): تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300°C بر توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی

در شکل (۴-۳) تأثیر دما ورودی به توربین بخار بر نسبت توان الکتریکی به ظرفیت گرمایشی و سرمایه‌اشی نشان داده شده است. که با افزایش دمای ورودی به توربین بخار توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی نیز افزایش می‌یابند. بنابراین نسبت توان الکتریکی به ظرفیت گرمایشی به دلیل تغییرات بیشتر توان الکتریکی در ازای دمای ورودی روندی افزایشی را به همراه خواهد داشت. ظرفیت سرمایه‌اشی نیز با فرض استفاده حداکثری از ظرفیت چیلر چون ثابت است بنابراین نسبت توان الکتریکی به ظرفیت سرمایه‌اشی نیز با افزایش همراه خواهد بود.



شکل (۴-۳) : تأثیر دمای ورودی به توربین بخار در فشار 3300 kPa بر نسبت توان الکتریکی به ظرفیت سرمایشی و ظرفیت گرمایشی

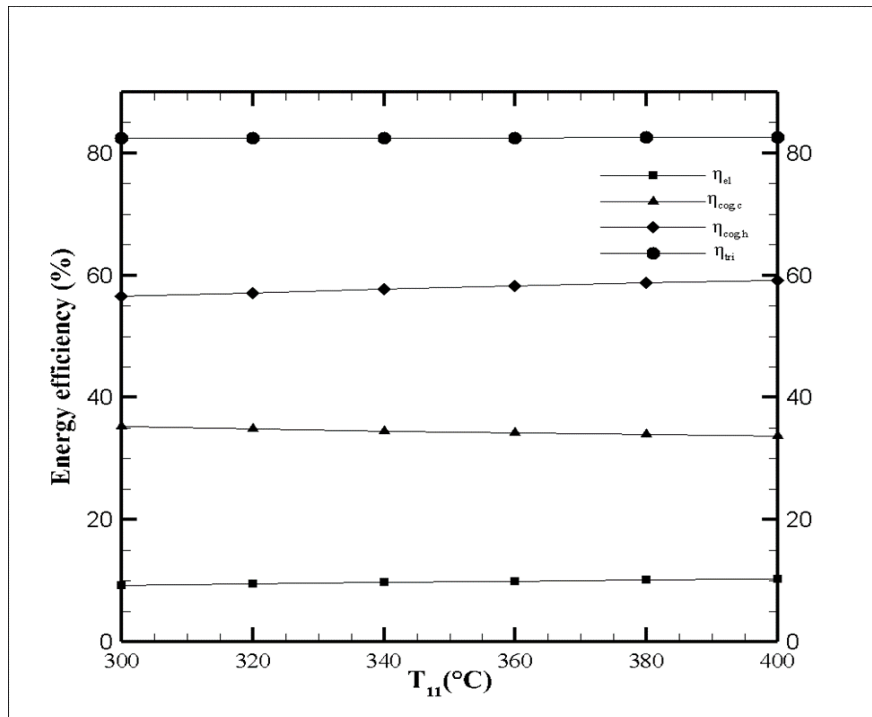
در شکل (۴-۴) تأثیر فشار ورودی به توربین بخار بر نسبت توان الکتریکی به ظرفیت گرمایشی و سرمایشی نشان داده شده است. با افزایش فشار ورودی به توربین بخار، توان الکتریکی افزایش می یابد، به علت افزایش آنتالپی ورودی و خروجی توربین بخار و ظرفیت گرمایشی به علت کاهش اختلاف آنتالپی ورودی و خروجی مبدل حرارتی کاهش می یابد. لذا نسبت توان الکتریکی به ظرفیت گرمایشی با افزایش همراه خواهد بود. همچنین با افزایش فشار ورودی به توربین بخار ظرفیت سرمایشی با توجه به فرض ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین نسبت توان الکتریکی به ظرفیت سرمایشی نیز افزایش پیدا خواهد کرد.



شکل (۴-۴): تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300°C بر نسبت توان الکتریکی به سرمایش و گرمایش

در شکل (۴-۵) تأثیرات تغییر دمای ورودی توربین بخار در فشار 3300 kPa بر راندمان الکتریکی، راندمان همزمان الکتریکی و سرمایش، راندمان همزمان الکتریکی و گرمایش و راندمان سیستم تولید همزمان سه‌گانه آورده شده است. راندمان الکتریکی با افزایش دمای ورودی به توربین بخار، چون توان الکتریکی افزایش یافته با افزایش همراه بود و مقدار آن از $9/281\%$ به $10/3\%$ می‌رسد. راندمان همزمان الکتریکی و گرمایشی، با افزایش دمای ورودی به توربین بخار توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی افزایش می‌یابد، لذا در مجموع راندمان همزمان الکتریکی و گرمایشی افزایش یافته و مقدار آن از $56/54\%$ به $59/19\%$ می‌رسد. راندمان همزمان الکتریکی و سرمایشی نیز کاهش می‌یابد. چون ظرفیت سرمایشی ثابت است و از طرفی هم با افزایش دمای ورودی به توربین بخار ظرفیت وارد شده به کل سیستم (انرژی ورودی به سیستم) و مصرف سوخت در حال افزایش است. لذا در مجموع راندمان همزمان الکتریکی و سرمایشی کاهش یافته و مقدار راندمان همزمان الکتریکی و سرمایشی از $35/2\%$ به $33/66\%$ می‌رسد.

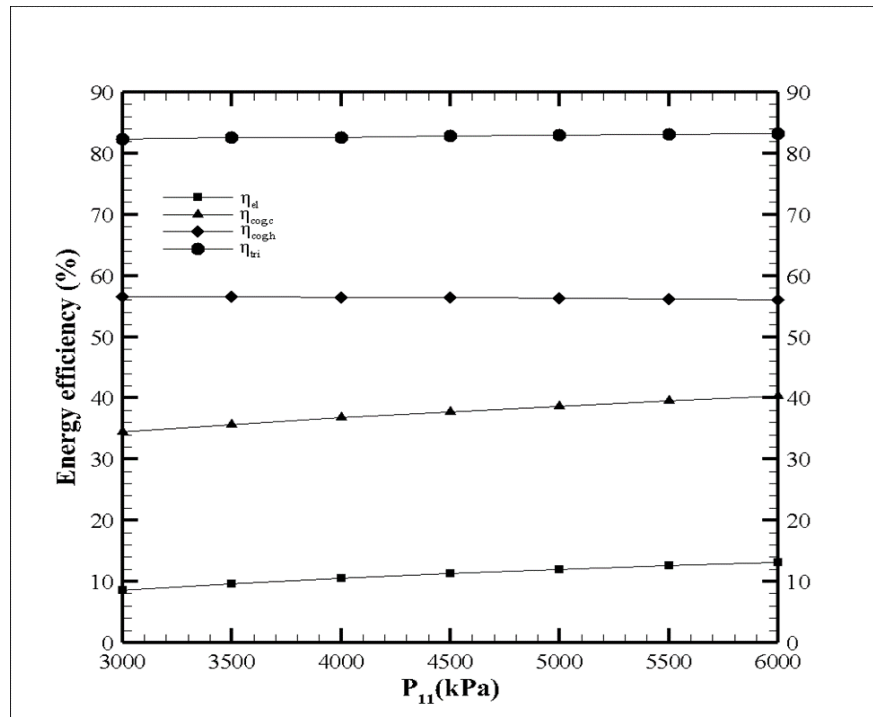
راندمان سیستم تولید همزمان سه‌گانه نیز با افزایش جزئی همراه خواهد بود به دلیل افزایش توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی و مقدار آن از ۸۲/۴۶٪ به ۸۲/۵۶٪ خواهد رسید.



شکل (۴-۵): تأثیر دمای ورودی به توربین بخار در فشار ۳۳۰۰ kPa بر راندمان

در شکل (۴-۶) تأثیر تغییرات فشار ورودی توربین بخار در دمای ۳۰۰ °C بر راندمان الکتریکی، راندمان همزمان الکتریکی و سرمایش، راندمان همزمان الکتریکی و گرمایش و راندمان سیستم تولید همزمان سه‌گانه آورده شده است. با توجه به شکل (۴-۶) راندمان الکتریکی با افزایش فشار ورودی به توربین بخار به علت افزایش اختلاف آنتالپی ورودی و خروجی به توربین بخار و افزایش توان الکتریکی، افزایش می‌یابد و مقدار آن از ۸/۶۴٪ به ۱۳/۱۵٪ خواهد رسید. راندمان همزمان الکتریکی و گرمایشی با افزایش فشار ورودی به توربین بخار به علت افزایش توان الکتریکی و کاهش ظرفیت گرمایشی با کاهش جزئی همراه خواهد بود و مقدار آن از ۵۶/۵۴٪ به ۵۶/۰۴٪ خواهد رسید. راندمان همزمان الکتریکی و سرمایشی با افزایش فشار ورودی به توربین بخار به علت، افزایش توان الکتریکی و ثابت بودن ظرفیت سرمایشی و همچنین کاهش مصرف سوخت در نتیجه، راندمان همزمان الکتریکی و سرمایشی مقدار آن

افزایش می‌یابد. مقدار آن از ۳۴/۴۵٪ به ۴۰/۲۹٪ خواهد رسید. راندمان سیستم تولید همزمان سه‌گانه نیز با افزایش همراه خواهد بود. به خاطر افزایش توان الکتریکی و کاهش ظرفیت حرارتی ورودی (انرژی ورودی) به سیستم تولید همزمان سه‌گانه به دلیل کاهش مصرف سوخت از ۸۲/۳۵٪ به ۸۳/۱۸٪ خواهد رسید.

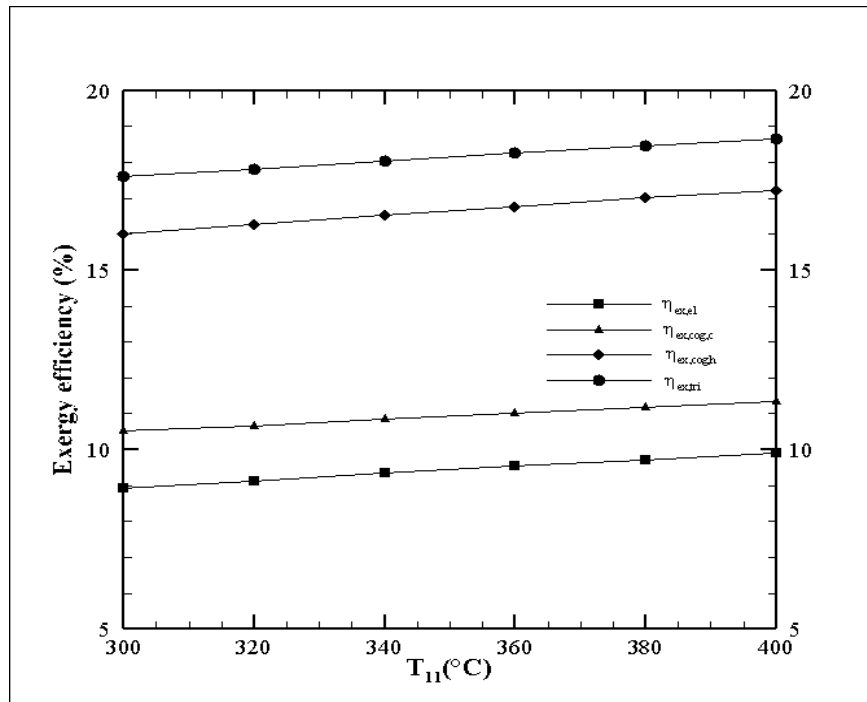


شکل (۴-۶): شکل تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای ۳۰۰ °C بر راندمان

در شکل (۴-۷) تأثیر افزایش دما ورودی توربین بخار در فشار ۳۳۰۰ kPa بر راندمان انرژی الکتریکی، راندمان انرژی همزمان الکتریکی و گرمایی، راندمان انرژی همزمان الکتریکی و سرمایشی و راندمان انرژی همزمان الکتریکی و سرمایشی و گرمایی نشان داده شده است. با افزایش دمای ورودی به توربین بخار چون توان الکتریکی افزایش می‌یابد لذا راندمان انرژی الکتریکی نیز افزایش پیدا خواهد کرد. راندمان انرژی همزمان الکتریکی و سرمایشی نیز با افزایش توان الکتریکی افزایش می‌یابد. راندمان انرژی همزمان الکتریکی و ظرفیت گرمایی نیز با افزایش توان الکتریکی و ظرفیت گرمایی با افزایش همراه خواهد بود و راندمان انرژی همزمان سه‌گانه نیز مانند سایر راندمان‌ها به علت افزایش

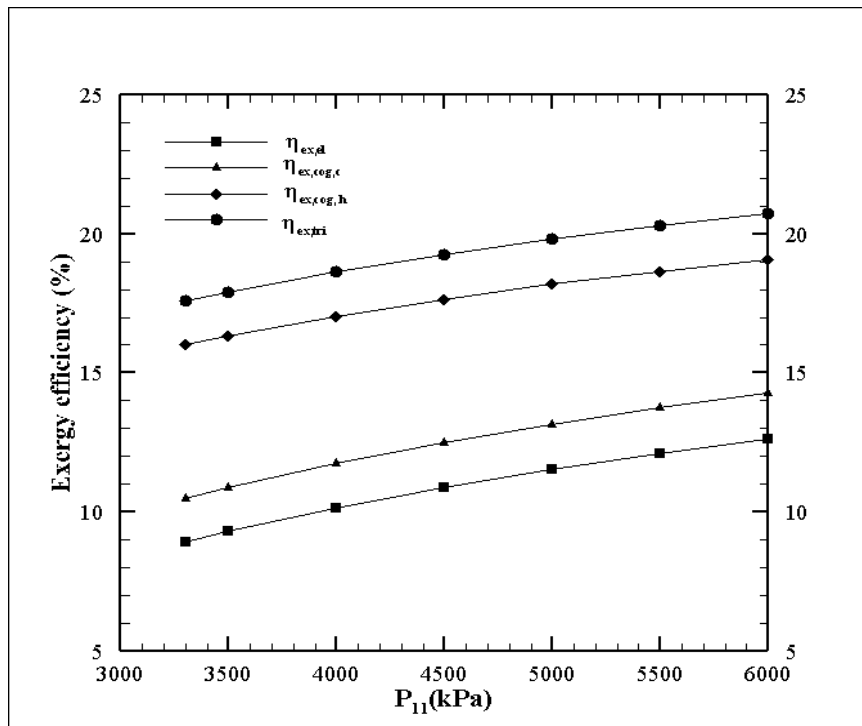
توان الکتریکی و ظرفیت گرمایی در مقایسه افزایش آگرژی سوخت در مجموع با افزایش همراه خواهد

بود.



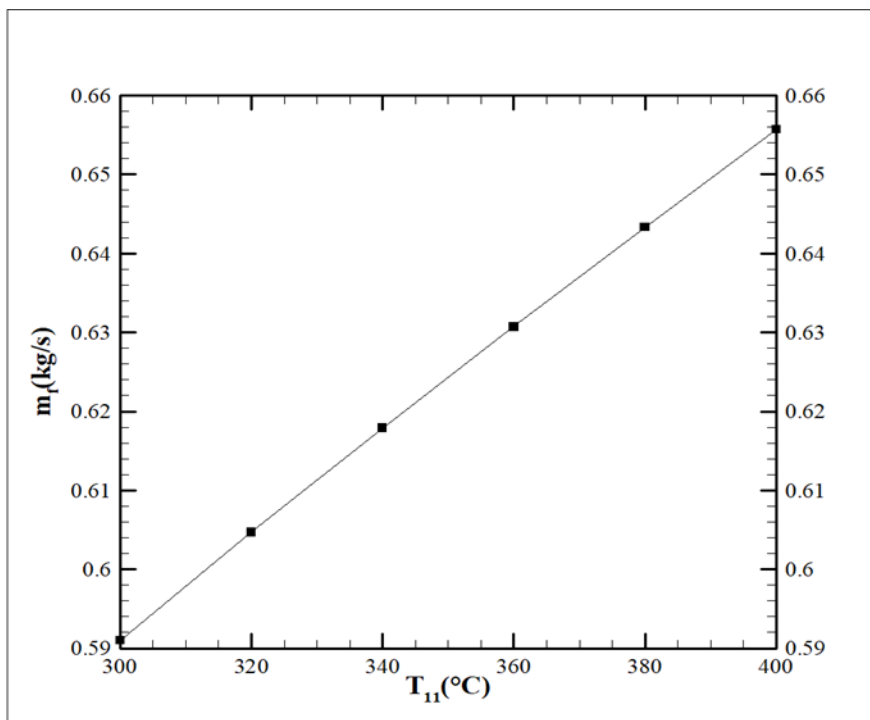
شکل (۴-۷): تأثیر دما ورودی توربین بخار در فشار 3300 kPa بر راندمان آگرژی

در شکل (۴-۸) تأثیر افزایش فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300°C بر راندمان آگرژی الکتریکی، راندمان آگرژی همزمان الکتریکی و گرمایی، راندمان آگرژی همزمان الکتریکی و سرمایش و راندمان آگرژی سیستم تولید همزمان سه گانه نشان داده شده است. کلیه راندمان‌های آگرژی نشان داده شده در شکل (۴-۸) به علت افزایش توان الکتریکی و کاهش آگرژی سوخت با افزایش همراه خواهند بود.



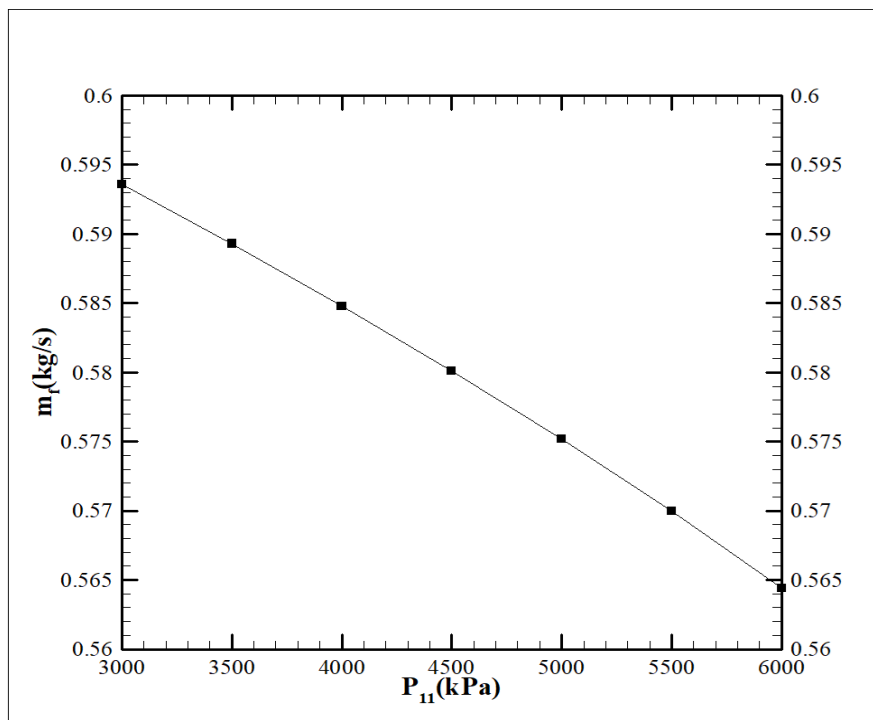
شکل (۴-۸): تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300°C بر راندمان انرژی

در شکل (۴-۹) تأثیر افزایش دمای ورودی به توربین بخار بر دبی مصرف سوخت نشان داده شده است. واضح است که به ازای افزایش دما ورودی به توربین بخار مصرف سوخت، به علت افزایش ظرفیت حرارتی ورودی به سیستم تولید همزمان سه‌گانه افزایش خواهد یافت و به عبارت دیگر سیستم تولید همزمان سه‌گانه برای آن که بتواند افزایش آنتالپی ایجاد شده را تأمین کند، باید سوخت بیشتری را مصرف کند.

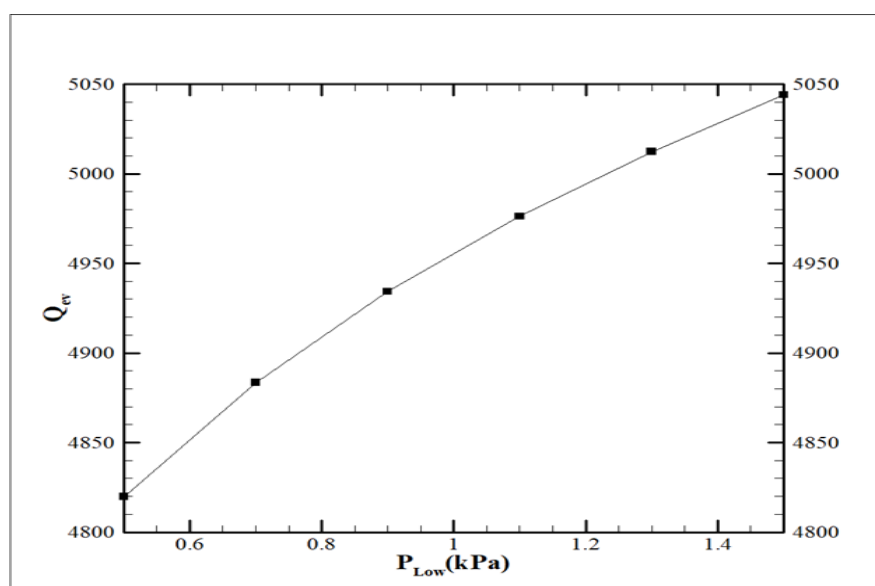


شکل (۴-۹) تأثیر افزایش دمای ورودی به توربین بخار بر دبی مصرف سوخت

در شکل (۴-۱۰) تأثیر افزایش فشار ورودی به توربین بخار بر دبی مصرف سوخت نشان داده شده است. که با افزایش فشار ورودی به توربین بخار به دلیل کاهش ظرفیت حرارت ورودی (انرژی ورودی) به سیستم تولید همزمان سه‌گانه مصرف سوخت نیز کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش فشار ورودی به توربین بخار موجب کاهش آنتالپی ورودی به توربین بخار خواهیم شد که باعث کاهش مصرف سوخت در بویلر خواهد شد.

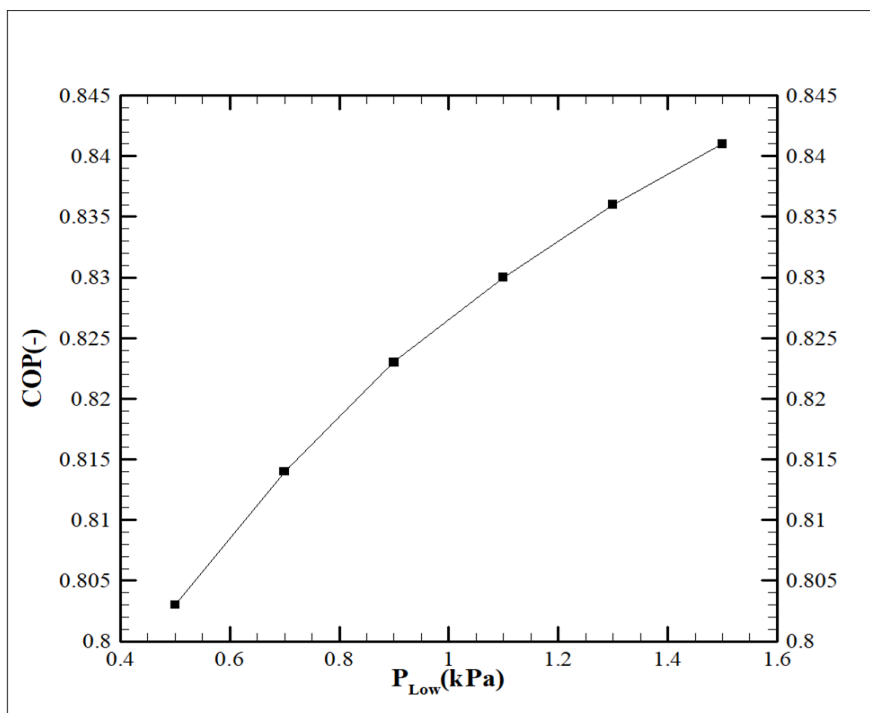


شکل (۴-۱۰) تأثیر تغییرات فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300°C بر دبی مصرفی سوخت در شکل (۴-۱۱) تأثیرات تغییر فشار پایین چیلر بر ظرفیت سرمایشی آورده شده است. که با افزایش فشار پایین چیلر جذبی موجب افزایش دبی ورودی و افزایش آنتالپی خروجی از اواپراتور می شویم که باعث افزایش ظرفیت سرمایشی چیلر جذبی تک اثره خواهد یافت.



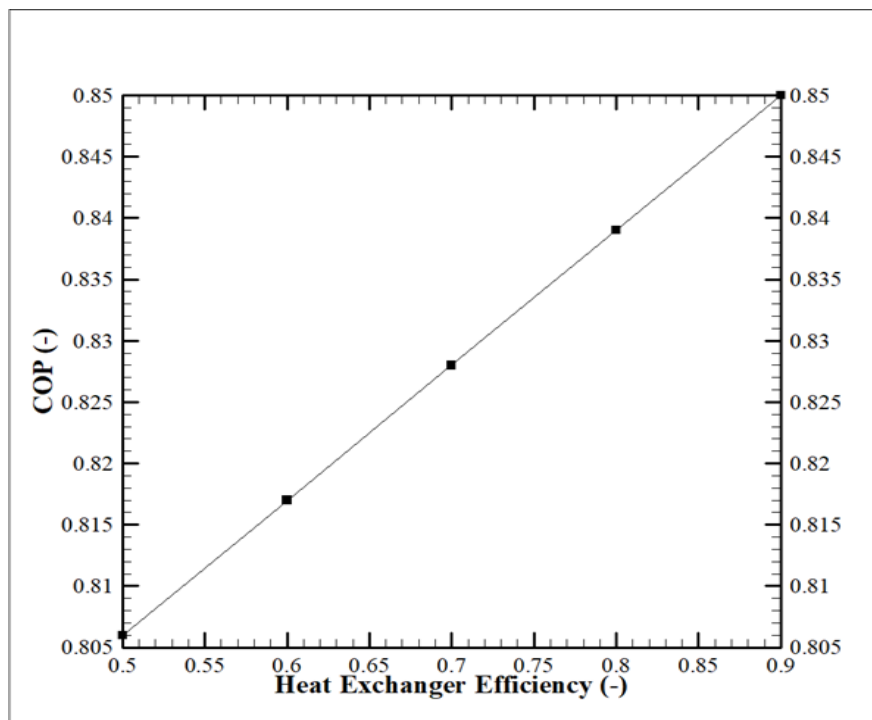
شکل (۴-۱۱) : تأثیر تغییرات فشار پایین چیلر جذبی بر توان سرمایشی

در شکل (۱۲-۴) تأثیر تغییرات فشار پایین چیلر جذبی بر ضریب عملکرد چیلر جذبی قابل مشاهده است. چون با افزایش فشار پایین چیلر جذبی ظرفیت سرمایشی زیاد می شود لذا با افزایش ظرفیت سرمایشی ضریب عملکرد چیلر جذبی نیز زیاد خواهد شد و همچنین با افزایش فشار پایین چیلر جذبی تک اثره موجب افزایش دبی و آنتالپی به اواپراتور می شویم که موجب افزایش ظرفیت سرمایش خواهد شد.



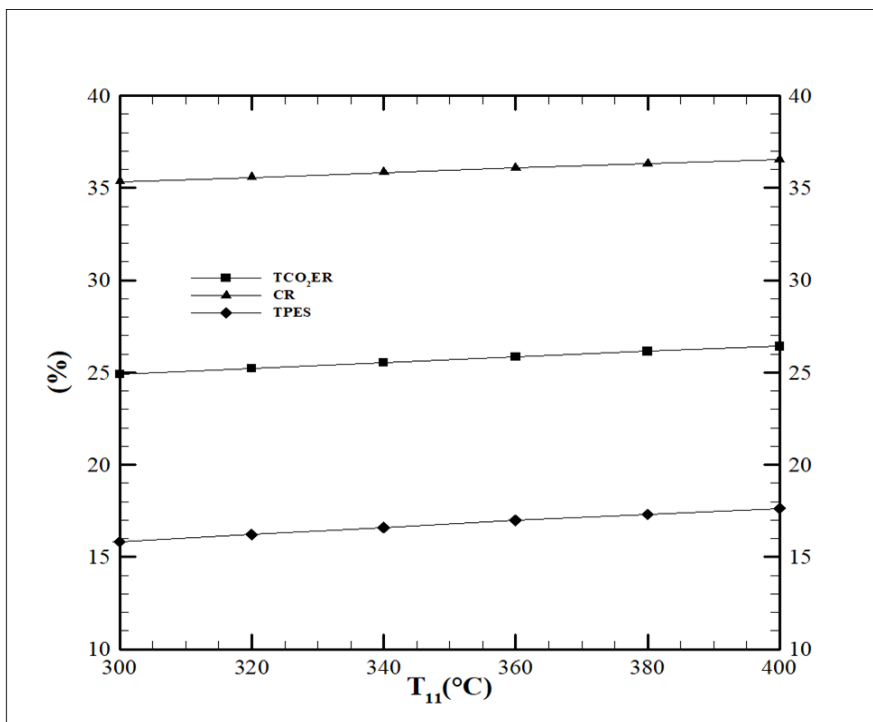
شکل (۱۲-۴): تأثیر تغییرات فشار پایین چیلر جذبی بر ضریب عملکرد چیلر

در شکل (۱۳-۴) تأثیر افزایش فشار پایین بر ضریب عملکرد چیلر جذبی تک اثره نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش راندمان مبدل حرارتی ضریب عملکرد چیلر جذبی نیز به دلیل بهبود انتقال حرارت انجام شده افزایش خواهد یافت.

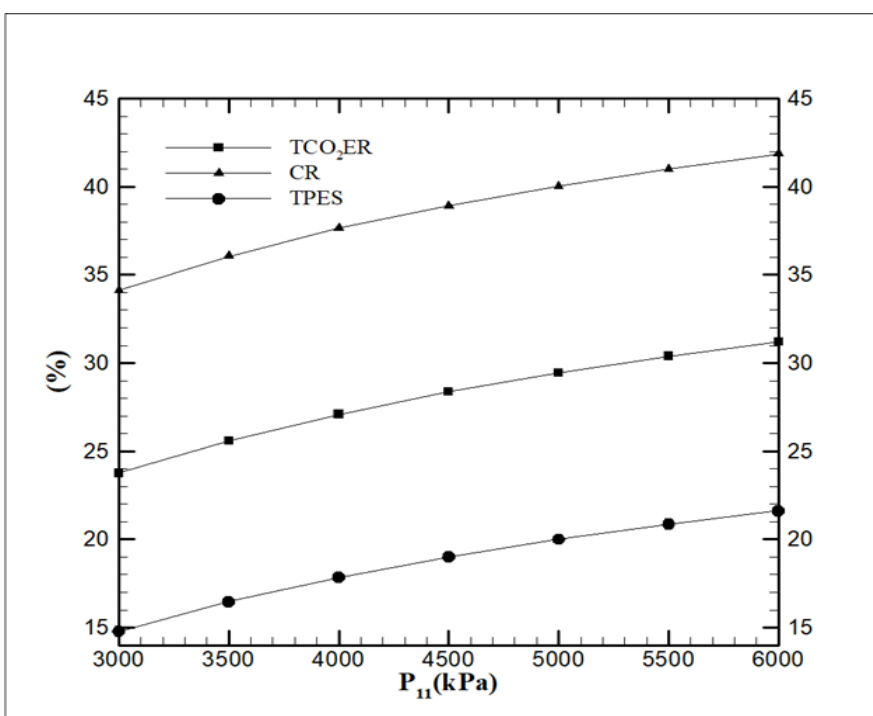


شکل (۴-۱۳) : تأثیر راندمان مبدل حرارتی چیلر بر ضریب عملکرد چیلر جذبی

در شکل (۴-۱۴) تأثیر افزایش دمای ورودی به توربین بخار در فشار 3300 kPa بر میزان درصد کاهش آلاینده‌گی، در صد کاهش سوخت و در صد کاهش هزینه‌های سوخت را نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش دمای ورودی به توربین بخار، میزان آلاینده‌گی، مصرف سوخت و هزینه‌های عملکردی افزایش می‌یابد؛ ولی با افزایش دما در صد کاهش آلاینده‌گی، در صد کاهش سوخت و درصد کاهش هزینه‌های سوخت در مقایسه با سیستم مجزا افزایش می‌یابد. برای درک بهتر در شکل (۴-۱۵) تأثیر افزایش فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300°C بر میزان درصد کاهش آلاینده‌گی، در صد کاهش سوخت و در صد کاهش هزینه‌های سوخت را نشان می‌دهد. با افزایش فشار ورودی به توربین بخار مصرف سوخت کاهش می‌یابد و به تبع آن، باعث کاهش آلاینده‌گی، کاهش مصرف و هزینه‌ها می‌شود. با توجه به شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) تأثیر فشار ورودی بر درصد کاهش آلاینده‌گی، درصد کاهش سوخت و درصد کاهش هزینه‌های عملکردی بیشتر از افزایش دما خواهد بود. زیرا با افزایش دما مصرف سوخت زیادتر خواهد شد.

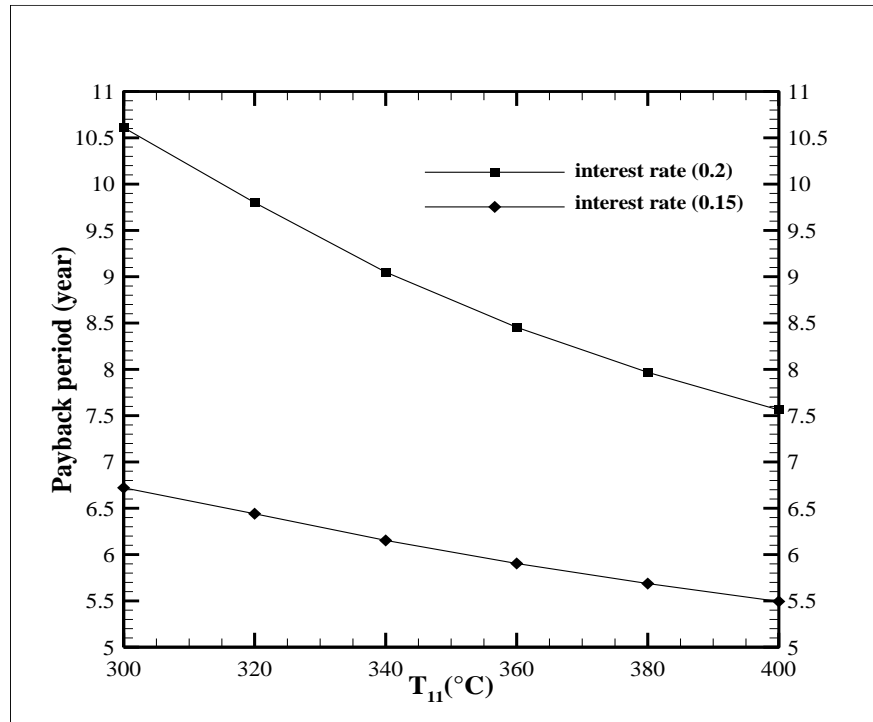


شکل (۴-۱۴): تأثیر دمای ورودی به توربین بخار در فشار 3300 kPa بر TCO_{2ER} , CR, TPES



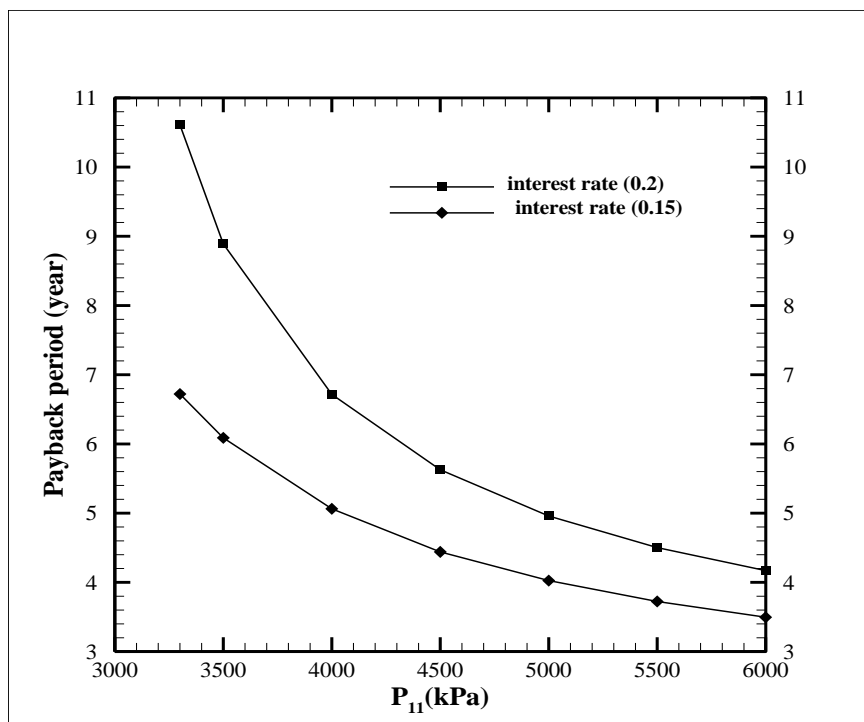
شکل (۴-۱۵): تأثیر فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300 °C بر TCO_{2ER} , CR, TPES

در شکل (۴-۱۶) تأثیرات افزایش دمای ورودی به توربین بخار بر بازگشت سرمایه با دو نرخ بهره ۲۰٪ و ۱۵٪ نشان داده شده است. که با افزایش دما دوره بازگشت سرمایه به علت این که توان‌های الکتریکی و ظرفیت گرمایی زیاد شده است کاهش خواهد یافت.



شکل (۴-۱۶): تأثیر تغییرات دمای ورودی توربین بخار در فشار 3300 kPa بر بازگشت سرمایه

در شکل (۴-۱۷) تأثیرات افزایش فشار ورودی به توربین بخار در دمای 300°C بر بازگشت سرمایه با دو نرخ بهره ۲۰٪ و ۱۵٪ نشان داده شده است. با افزایش فشار ورودی به توربین بخار سبب افزایش توان الکتریکی، کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های ناشی از آن می‌شویم به همین دلیل دوره بازگشت سرمایه کاهش می‌یابد.



شکل (۴-۱۷): تأثیر تغییرات فشار ورودی به توربین بخار در دمای ۳۰۰ °C بر بازگشت سرمایه

در این فصل معتبر سازی مدل چیلر جذبی و توربین بخار انجام شد. سپس مدل سازی حرارتی سیستم تولید همزمان سه گانه با محرک اولیه توربین بخار توسعه داده شده در شرایط عملکردی مختلف توربین بخار از دیدگاه انرژی، زیست محیطی و اقتصادی انجام گرفت و در نهایت بهینه سازی هزینه های کلی بر اساس روش ژنتیک با متغیر تصمیم گیری دما و فشار ورودی به توربین بخار، راندمان ایزنتروپیک توربین بخار و راندمان مبدل حرارتی صورت گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده، سیستم تولید همزمان سه گانه پیشنهادی، توانایی تأمین ۱۷۷۶ کیلووات توان الکتریکی، ۹۰۴۴ کیلووات ظرفیت گرمایشی و ۴۹۵۹/۴۸۹ کیلووات ظرفیت سرمایشی در حالت مرجع می باشد. همچنین این سیستم در مقایسه با سیستم تولید جداگانه تأمین انرژی برای همین مقدار انرژی ورودی دارای ۱۵/۸۳٪ در صد کاهش مصرف انرژی اولیه، ۲۴/۹۱٪ درصد کاهش انتشار آلاینده دی اکسید کربن و ۳۵/۳۴٪ درصد کاهش هزینه های عملکردی خواهد داشت. راندمان الکتریکی، راندمان همزمان الکتریکی و سرمایش، راندمان همزمان الکتریکی و گرمایش و راندمان سیستم تولید همزمان سه گانه و همچنین راندمان انرژی نیز

مورد بررسی قرار گرفت. دوره بازگشت سرمایه نیز در حالت مرجع و با دو نرخ بهره ۲۰٪ و ۱۵٪ مورد بررسی قرار گرفت، که مدت بازگشت سرمایه به ترتیب برابر ۱۰/۶۱ سال و ۶/۷۲۱ سال به دست آمد. تجزیه و تحلیل چیلر جذبی نیز تحت شرایط عملکردی مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفت و تأثیرات تغییرات فشار پایین بر ظرفیت سرمایشی چیلر و تأثیرات فشار پایین چیلر و راندمان مبدل حرارتی چیلر بر ضریب عملکرد چیلر نیز مورد بررسی قرار گرفت. بررسی ها تحت شرایط دما و فشار های مختلف ورودی به توربین بخار از سه دیدگاه انرژی، زیست محیطی و اقتصادی نیز صورت گرفته است و در نهایت نیز نتایج بهینه سازی هزینه کل سالیانه ذکر گردیده است.

فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

در این پایان نامه به مدل سازی حرارتی سیستم تولید همزمان سه گانه (سرمایش، گرمایش و برق) با محرک اولیه توربین بخار از دیدگاه انرژی، زیست محیطی و اقتصادی پرداخته شد. تحلیل کار انجام شده به کمک نرم افزار EES به دلیل داشتن کتابخانه قوی شامل خواص ترمودینامیکی مواد با داشتن حرارت اتلافی توربین بخار انجام گرفت. سپس اثرات دما و فشار ورودی به توربین بخار روی راندمان، درصد کاهش مصرف انرژی اولیه، درصد کاهش انتشار آلاینده‌گی و درصد کاهش هزینه‌های عملکرد سیستم تولید همزمان سه گانه در مقایسه با سیستم‌های مرسوم تولید جداگانه انرژی، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصله در ادامه ذکر می گردد.

۵-۲ نتیجه گیری

۱. سیستم تولید همزمان سه گانه پیشنهادی، توانایی تأمین ۱۷۷۶ کیلووات توان الکتریکی، ۹۰۴۴ کیلووات توان گرمایشی و ۴۹۵۹/۴۸۹ کیلووات توان سرمایشی را می باشد.
۲. راندمان الکتریکی سیستم ۹/۲۸۱٪، راندمان تولید همزمان الکتریکی و سرمایش ۳۵/۲٪، راندمان تولید همزمان الکتریکی و گرمایش ۵۶/۵۴٪ و راندمان سیستم تولید همزمان سه گانه ۸۲/۴۶٪ خواهد شد.
۳. با افزایش دمای ورودی به توربین بخار توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی افزایش پیدا خواهند کرد. با افزایش فشار ورودی به توربین بخار توان الکتریکی افزایش و ظرفیت گرمایشی کاهش می یابد. ظرفیت سرمایشی در هر دو حالت ثابت در نظر گرفته شده است.
۴. از دیدگاه کاهش آلاینده‌گی زیست محیطی سیستم حاضر در مقایسه با سیستم‌های سنتی، ۲۴/۹۱٪ کاهش آلاینده‌گی رخ می دهد.
۵. از دیدگاه صرفه جویی در انرژی اولیه سیستم حاضر در مقایسه با سیستم سنتی ۱۵/۸۳٪ کاهش صرفه جویی در انرژی اولیه رخ می دهد.
۶. از دیدگاه هزینه‌های عملکردی سیستم حاضر در مقایسه با سیستم سنتی ۳۵/۳۴٪ کاهش رخ می دهد.

۷. با افزایش دمای ورودی به توربین بخار صرفه‌جویی در انرژی اولیه، کاهش آلایندگی و هزینه‌های عملکردی روندی افزایشی در مقایسه با سیستم‌های سنتی خواهند داشت.
۸. با افزایش فشار ورودی به توربین بخار صرفه‌جویی در انرژی اولیه، کاهش آلایندگی و هزینه‌های عملکردی روندی افزایشی در مقایسه با سیستم‌های سنتی خواهند داشت.
۹. با افزایش دمای ورودی به توربین بخار دوره بازگشت سرمایه به دلیل افزایش توان الکتریکی و ظرفیت گرمایشی کاهش پیدا خواهد کرد.
۱۰. با افزایش فشار پایین چیلر جذبی تک اثره ظرفیت سرمایه‌گذاری افزایش خواهد یافت.
۱۱. با افزایش فشار ورودی به توربین بخار (که ناشی از افزایش فشار خروجی پمپ) باعث کاهش در مصرف سوخت در بویلر سیستم تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی می‌شویم.
۱۲. در سیستم تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی با نرخ بهره ۲۰٪ دوره بازگشت سرمایه ۱۰/۶۱ سال و با نرخ بهره ۱۵٪ دوره بازگشت سرمایه ۶/۷۲۱ سال خواهد بود.
۱۳. با افزایش دما و فشار ورودی به توربین بخار دوره بازگشت سرمایه کاهش خواهد یافت.
۱۴. یکی از معایب استفاده از محرک اولیه توربین بخار، پایین بودن توان خروجی نسبت به اتلافات حرارتی است. به عبارت دیگر پایین بودن راندمان الکتریکی نسبت به راندمان سیستم تولید همزمان سه‌گانه.
۱۵. بهینه‌سازی هزینه‌های کل سالیانه با روش الگوریتم ژنتیک صورت گرفت و نتایج بهینه‌سازی ذکر گردید.

۳-۵ پیشنهادها

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

- نمونه مبنایی برای سیستم حاضر معرفی شود و محاسبات برای انتخاب ظرفیت بهینه محرک اولیه با توجه به میزان انرژی موردنیاز نمونه مبنا محاسبه شود.
- تحلیل اقتصادی سیستم برای نمونه مبنا بر اساس دوره بازگشت سرمایه و میزان صرفه‌جویی در مصرف انرژی و تحلیل زیست‌محیطی برای نمونه مبنا انجام پذیرد.
- بررسی سوخت‌های مختلف مورد استفاده در بویلر برای این آرایش و تحلیل انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی هم می‌تواند مفید باشد.
- مقایسه بین سیستم تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی با سایر محرک اولیه سیستم تولید همزمان سه‌گانه از دیدگاه انرژی، زیست‌محیطی و اقتصادی انجام شود.
- ترکیب محرک توربین گاز با توربین بخار جهت افزایش راندمان و مقایسه با راندمان نیروگاه سیکل ترکیبی مورد بررسی قرار گیرد.
- بهینه‌سازی چند هدفه برای سیستم تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی صورت گیرد.

مراجعه

[1] Gu, Q., Ren, H., Gao, W., and Ren, J. (2012) "**Integrated assessment of combined cooling heating and power systems under different design and management options for residential buildings in Shanghai**" *Energy and Buildings*, 51, pp 143-152.

[2] M, Maerefat and P, Shafie. (2014) "**Design of CCHP system for office buildings in Tehran and thermodynamical, environmental and economical evaluation in comparison to conventional system**" *Modares Mechanical Engineering*, 14, 6, pp 124-134 (In Persian).

[3] Kerr T. (2008) "**Combined heating and power and emissions trading: options for policy makers**" *International Energy Agency*.

[4] Mago P.J., Hueffed A. and Chamra L.M. (2010) "**Analysis and optimization of the use of CHP-ORC systems for small commercial buildings**" *Energy and Buildings*, 42, 9, pp 1491-1498.

[5] ملکیان ع، پایان نامه ارشد: "بررسی و بهبود عملکرد سیستم CCHP"، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[6] علی زاده خارکشی ب، (۱۳۹۴)، پایان نامه ارشد: "مدل سازی و بهبود عملکرد سیستم تولید همزمان گرمایش، سرمایش و برق با محرک اولیه پیل سوختی"، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[7] Goldstein L., Hedman B., Knowles D., Freedman S.I., Woods R. and Schweizer T. (2003), "**Gas-fired distributed energy resource فناوری characterizations**", Reprinted from: National Renewable Energy Laboratory, pp11-30.

[8] Harrod J. and Mago P.J. (2010) "**Performance analysis of a combined cooling, heating and power system driven by a waste biomass fired Stirling engine**" *IMEchE Part C: J. Mechanical Engineering Science.*, 225, pp 420-428.

[9] Kolanowski, B. F. (2013). "**Small-scale cogeneration handbook**". Lulu Press, Inc.

[10] Petchers N. (2003), "**Combined heating, cooling & power handbook: Technologies & applications: An integrated approach to energy resource optimization**", Reprinted from: The Fairmont Press, Inc.

[11] Praetorius B. and Schneider L. (2006), "**MICRO COGENERATION: TOWARDS A DECENTRALIZED AND SUSTAINABLE GERMAN ENERGY SYSTEM**", 29th IAEE International Conference, Potsdam, pp 7-10.

- [12] Staunton R. and Ozpineci B. (2003), "**Microturbine power conversion technology review**", Reprinted from: United States. Department of Energy.
- [13] Chamra L.M. and Mago P. (2007) "**Micro-CHP power generation for residential and small commercial buildings**" *Electric Power Research Trends*, pp 47-101.
- [14] Batmaz I. and Ustun S. (2008) "**Design and manufacturing of a V-type Stirling engine with double heaters**" *Applied Energy.*, 85, 11, pp 1041-1049.
- [15] Costa S.C., Barrutia H., Esnaola J.A. and Tutar M. (2013) "**Numerical study of the pressure drop phenomena in wound woven wire matrix of Stirling regenerator**" *Energy Conversion and Management.*, 67, pp 57-65.
- [16] Enatec Company., <http://www.enatec.org>., accessed January 1, 2017.
- [17] Ziabasharhagh M. and Mahmoodi M. (2012) "**Analysis and optimization of beta-type Stirling engine taking into account the non-ideal regenerator thermal and hydraulic losses effects**" *Modares Mechanical Engineering.*, 12, 2, pp 45-57 (In Persian).
- [18] Korlu M., Pirkandi J. and Maroufi A. (2017) "**Thermodynamic analysis of a gas turbine cycle equipped with a non-ideal adiabatic model for a double acting Stirling engine**" *Energy Conversion and Management.*, 147, pp 120-134.
- [19] Q.Gu,RenchH,GaobW,RendJ.Integratedassessment ofcombined cooling heating and power systems under different design and management for residential buildings in Shanghai. *Energy Build* pp. 51–143,2012.
- [20] Cardona E., Piacentino A. and Cardona F. (2006) "**Energy saving in airports by trigeneration. Part I: Assessing economic and technical potential**" *Applied Thermal Engineering*, 26, 14-15, pp 1427-1436.
- [21] Cardona E., Sannino P., Piacentino A. and Cardona F. (2006) "**Energy saving in airports by trigeneration. Part II: Short and long term planning for the Malpensa 2000 CHCP plant**" *Applied Thermal Engineering*, 26, 14-15, pp 1437-1447.
- [22] Mago P.J. and Chamra L.M. (2009) "**Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations**" *Energy and Buildings*, 41, 10, pp 1099-1106.
- [23] Cardona E. and Piacentino A. (2003) "**A methodology for sizing a trigeneration plant in mediterranean areas**" *Applied Thermal Engineering*, 23, 13, pp 1665-1680.
- [24] Cardona E., Piacentino A. and Cardona F. (2006) "**Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid CHCP-heat pump systems**" *Energy Conversion and Management*, 47, 20, pp 3530-3542.

- [25] Chamra L.M., Mago P.J. and Fumo N. (2009) "**Hybrid-cooling, combined cooling, heating, and power systems**" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223, 5, pp 487-495.
- [26] Fang F., Wei L., Liu J., Zhang J. and Hou G. (2012) "**Complementary configuration and operation of a CCHP-ORC system**" *Energy*, 46, 1, pp 211-220.
- [27] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Sizing the prime mover of residential microcombined cooling heating and power (CCHP) system by multicriteria sizing method for different climates, *Energy* Vol. 54, pp. 291–301, 2013.
- [28] Cao J.-C. and Liu F.-Q. (2008) "**Simulation and optimization of the performance in the air-conditioning season of a CCHP system in China**" *Energy and Buildings*, 40, 3, pp 185-192.
- [29] Li H., Fu L., Geng K. and Jiang Y. (2006) "**Energy utilization evaluation of CCHP systems**" *Energy and Buildings*, 38, 3, pp 253-257.
- [30] Cho H., Luck R., Eksioğlu S.D. and Chamra L.M. (2009) "**Cost-optimized real-time operation of CHP systems**" *Energy and Buildings*, 41, 4, pp 445-451.
- [31] M. A. Ehyaei, P. Ahmadi, F. Atabi, M. R. Heibati, M. Khorshidvand, Feasibility study of applying internal combustion engines in residential buildings by exergy, economic and environmental analysis, *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 405-413, 2012.
- [32] Pospisil J., Fiedler J., Skala Z. and Baksa M. (2006) "**Comparison of cogeneration and trigeneration technology for energy supply of tertiary buildings**" *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, 1, 3, pp 262-267.
- [33] Chicco G. and Mancarella P. (2008) "**A unified model for energy and environmental performance assessment of natural gas-fueled polygeneration systems**" *Energy Conversion and Management*, 49, 8, pp 2069-2077.
- [34] P. Ahmadi, I. Dincer, M.A. Rosen, "Exergo-environmental analysis of an integrated organic Rankine cycle for trigeneration", *Journal of Energy Conversion and Management*, 2012; 64, 447-453.
- [35] P. Ahmadi, I. Dincer, "Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant", *Journal of Applied Thermal Engineering*, 2011; 31, 2529-2540.
- [36] S. Sanaye, and M. R. Ardali, Estimating the power and number of microturbines in small-scale combined heat and power systems, *Applied Energy* 86(6):pp.895-903, 2009.
- [37] Ameri MO, Hejazi SH. The study of capacity enhancement of the Chabahar gas turbine installation using an absorption chiller. *Applied thermal engineering*. 2004 Jan 1;24(1):59-68.

- [38] Akkaya, A.V, Sahin, B., and Erdem, H.H., “An Analysis of SOFC/GT CHP System Based on Exergetic Performance Criteria”, *Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 2566-2577,(2008).
- [39] Adam, A., Fraga, E.S., Brett, D.J., "Options for Residential Building Services Design Using Fuel Cell Based Micro-CHP and the Potential For Heat Integration," *Applied Energy*, Vol. 138, pp. 685-694,2015.
- [40] Dodds, P.E., Hawkes, A., *The Role of Hydrogen and Fuel Cells In Providing Affordable, Secure Low-Carbon Heat*, University College London, 2014.
- [41] Chahartaghi M. and Alizadeh-Kharkeshi B. (2016) "**Performance analysis of a combined cooling, heating and power system driven by PEM fuel cell at different conditions**" *Modares Mechanical Engineering.*, 16, 3, pp 383-394 (In Persian).
- [42] R. Karami, H. Sayyaadi, Optimal sizing of Stirling-CCHP systems for residential buildings at diverse climatic conditions, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 89, No. 1, pp. 377-393, 2015.
- [43] F. Al-Sulaiman, I. Dincer, F. Hamdullahpur, "Energy and exergy analyses of biomass trigeneration systems using an organic rankine cycle", *Journal of Energy*, 2012; 45, 975-985.
- [44] Costa A., Paris J., Towers M. and Browne T. (2007) "**Economics of trigeneration in a kraft pulp mill for enhanced energy efficiency and reduced GHG emissions**" *Energy*, 32, 4, pp 474-481.
- [45] Poredoš A., Kitanovski A. and Tuma M. (2002) "**The energy efficiency of chillers in a trigeneration plant**" *Forschung im Ingenieurwesen*, 67, 1, pp 40-44.
- [46] Kerr T. *Combined heating and power and emissions trading: options for policy makers*. France: International Energy Agency; 2008.
- [47] Lian Z, Chua K, Chou S. A thermoeconomic analysis of biomass energy for trigeneration. *Applied Energy* 2010; 87(1):84-95
- [48] Fahad A Al-sulaiman, Feridun Hamdullahpur, and Ibrahim Dincer, ‘Greenhouse Gas Emission and Exergy Assessments of an Integrated Organic Rankine Cycle with a Biomass Combustor for Combined Cooling , Heating and Power Production’, *Applied Thermal Engineering* 31,no.4(2011):439–46,
- [49] I. Vaja, A. Gambarotta, "Internanal combustion engine (ICE) bottoming with organic Rankine cycle (ORC)"; *Journal of Energy*, 2010; 35(2), 1048-1093.

- [50] H. Wang, R. Peterson, K. Harada, E. Miller, R. Ingram-Goble, I. Fisher, "Performance of a combined organic rankine cycle and vapor compression cycle for heat activated cooling", *Journal of Energy*, 2011; 36(1), 447-458.
- [51] M. He, X. Zhang, K. Zeng, K. Gao, "A combined thermodynamic cycle used for waste heat recovery of internal combustion engine", *Journal of Energy*, 2011; 36(12),6821-6829.
- [52] F. Al-Sulaiman, I. Dincer, F. Hamdullahpur, "Exergy analysis of an integrated solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle for cooling, heating and power production", *Journal of Power Sources*, 2010; 195(8), 2346-2354.
- [53] M. Yari, "Performance analysis and optimization of a new two-stage ejector expansion transcritical CO₂ refrigeration cycle", *International Journal of Thermal Science*, 2009; 48, 1997-2005.
- [54] Y. Dai, J. Wang, L. Gao, "Exergy analysis, parametric analysis and optimization for a novel combined power and ejector refrigeration cycle", *Journal of Applied Thermal Engineering*, 2009; 29, 1983-1990.
- [55] J. Wang, M. Wang, Y. Zhao, P. Zhao, Y. Dai, "Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flatplate solar collectors", *Journal of Applied Thermal Engineering*, 2013; 50, 816-825.
- [56] J. Wang, Y. Zhequan, E. Zhou, Y. Dai, "Parametric analysis and optimization of a kalian cycle driven by solar energy", *Journal of Applied Thermal Engineering*, 2013; 50, 408-415.
- [57] Ibrahim Dincer and Murat E Demir, 4 . 8 Steam and Organic Rankine Cycles, vol. 4, 2018, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00410-7>.
- [58] Ochoa, A. A. V., Dutra, J. C. C., Henríquez, J. R. G., & dos Santos, C. A. C. (2016). "Dynamic study of a single effect absorption chiller using the pair LiBr/H₂O". *Energy Conversion and Management* ., 108, pp 30-42.
- [59] Mohammad Abbasi, Mahmood Chahartaghi, and Seyed Majid Hashemian, 'Energy , Exergy, and Economic Evaluations of a CCHP System by Using the Internal Combustion Engines and Gas Turbine as Prime Movers', *Energy Conversion and Management* 173, no. March (2018): 359–74,
- [60] Sheykhi, Mohammad, Mahmood Chahartaghi, Mohammad Mahdi Balakheli, Behrad Alizadeh Kharkeshi, and Seyyed Mahdi Miri. 'Energy, Exergy, Environmental , and Economic Modeling of Combined Cooling , Heating and Power System with Stirling Engine and Absorption Chiller'. *Energy Conversion and Management* 180, no. August 2018 (2019): 183–95. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.102>.

- [61] Kaushik S.C., Arora A., Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water-lithium bromide absorption refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration* 2009; 32:1247–1258
- [62] Shabbir, Imran, and Mojtaba Mirzaeian. ‘ScienceDirect Feasibility Analysis of Different Cogeneration Systems for a Paper Mill to Improve Its Energy Efficiency’. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 1–14.
- [63] Xu, Donghao, and Ming Qu. ‘Energy, Environmental, and Economic Evaluation of a CCHP System for a Data Center Based on Operational Data’. *Energy & Buildings* 67 (2013): 176–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.021>.
- [64] Mehdi Farahnak et al., ‘Optimal Sizing of Power Generation Unit Capacity in ICE-Driven CCHP Systems for Various Residential Building Sizes’, *APPLIED ENERGY* 158 (2015): 203–19, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.050>.
- [65] Klein SA. Engineering equation solver. Academic Professional. Version 9.478, www.fchart.com/ees/ees.shtml; 2013
- [66] Zhang, Jiaxuan, Sheng Cao, Lijun Yu, and Yaodong Zhou. ‘Comparison of Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) Systems with Different Cooling Modes Based on Energetic, Environmental and Economic Criteria’. *Energy Conversion and Management* 160, no. December 2017 (2018): 60–73.
- [67] ‘U . S . Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership’, no. September (2017).
- [68] Tavakoli, Fateme, Dastjerd Mohammad, Mustafa Ghafuoryan, and Seyyed Ehsan. ‘Tech Economic Optimization of CCHP System with Rely the Time Value of Money, in Payback Period’ 15, no. 5 (2015): 254–60.

Abstract

A steam turbine is a type of prime mover used in a trigeneration system. A steam turbine is used of generating electrical power by converting steam energy into mechanical energy. This study performs the estimation of percentages of emission reductions, economic analysis and technical evaluations for a combined cooling heating and power (CCHP) or trigeneration with Rankine cycle which natural gas has been used as fuel. This trigeneration system includes a boiler, a steam turbine, a heat exchanger, a single effect absorption chiller and pump. Some specific parameters in this study are considered including the electrical efficiency, efficiency of cogeneration of electricity and cooling, efficiency of cogeneration of electricity and heating and trigeneration system efficiency, as well as exergy efficiency.

Various output and environmental performance parameters such as percentage reduction in operating costs, percentage of fuel consumption reduction, percentage of emission reductions and economic and technical discussions under the influence of different temperatures and pressures of steam turbine input are investigated.

Also, the performance of absorption chiller and trigeneration system under different operating conditions have been investigated. This study shows that the use of the Trigenation system results in an increase of 23.75% in Trigenation CO₂ Emission Reduction (TCO₂ER) and 15.86% in Trigenation Primary Energy Saving (TPES) and 33.14% in Operational Cost Reduction (CR) to conventional systems.

There is considerable progress when using a Trigenation system. The efficiency of the Trigenation system will be 82.64%. Optimization of total annual costs has also been done with of steam turbine input temperature and pressure. Isentropic efficiency and Heat Exchanger Efficiency decision variables.

Keywords: Trigenation system, economic evaluations, technical evaluations, heat exchanger, single effect absorber chiller, steam turbine, CO₂ Emission Reduction



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

Thermodynamic analysis and technical and economic optimization of combined cooling, heating and power system with steam turbine as prime mover.

By: Reza Namdarian

Supervisors:

Dr. Mahmood Chahartaghi

Dr. Majid Hashemian

January 2020