





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
رشته تبدیل انرژی-گرایش سیستم‌های انرژی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

تحلیل انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان در فرآیند تولید شکر در کارخانه قند و شکر شاهرود و امکان‌سنجی بهبود شرایط فنی و اقتصادی

نگارنده: رحمت ملک

اساتید راهنما:

دکتر سید مجید هاشمیان

دکتر محمود چهارطاقی

شهریورماه ۱۳۹۸

تقدیم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه‌ی آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش بهره‌مند گردم. به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند ...

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

سپاس‌گزاری

سپاس و ستایش سزاوار پروردگاری است که به آراستن انسان به زیور علم و معرفت او را اشرف مخلوقات گرداند. اینک که به لطف و عنایت خداوند متعال موفق به انجام و ارائه‌ی پروژه‌ی خود شده‌ام لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های علمی و زحمات بی‌دریغ اساتید گران‌قدر و فرهیخته، جناب آقای دکتر سید مجید هاشمیان و جناب آقای دکتر محمود چهارطاقی، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم که همواره و در تمامی عرصه‌های تحصیلی و انجام پروژه‌ی حاضر بنده را از راهنمایی‌های خود بهره‌مند نمودند. از خداوند منان برای این بزرگواران آرزوی توفیق و سربلندی روزافزون را خواستارم.

همچنین از سایر اساتید و دوستانی که در طول دوره‌ی تحصیل راهنما و همراه بنده بوده‌اند کمال تشکر و قدردانی دارم.

تعهدنامه

اینجناب رحمت ملک دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-گرایش سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با عنوان "تحلیل انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان در فرآیند تولید شکر در کارخانه شکر شاهرود و امکان سنجی بهبود شرایط فنی و اقتصادی" تحت راهنمایی جناب آقایان دکتر سید مجید هاشمیان و دکتر محمود چهارطاقی متعهد می‌شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته‌شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

کارخانجات قند و شکر به عنوان یکی از مهم‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جوامع صنعتی ایفای نقش می‌نمایند. میزان مصرف انرژی در این واحدهای تولیدی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و می‌بایست این میزان مصرف انرژی، بهینه و هدفمند گردد. جایگزینی سیستم‌های کارآمدتر مانند سیستم‌های تولید همزمان به جای سیستم‌های سنتی باعث افزایش راندمان انرژی، راندمان انرژی، کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های عملکردی می‌گردد. از این رو در این پژوهش ۶ سناریو برای جایگزینی سیستم‌های تولید همزمان به جای سیستم‌های سنتی برای کارخانه قند و شکر شاهرود مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از سیستم هیبریدی تولید همزمان سبب بهبود راندمان انرژی و انرژی و کاهش هزینه‌های عملکردی و مصرف سوخت می‌گردد. در میان ۶ سناریوی معرفی شده، ترکیب موتور گازسوز و توربین بخار به عنوان بهترین سناریو انتخاب گردید. نتایج نشان می‌دهد استفاده از این ترکیب راندمان انرژی ۸۰ درصدی و راندمان انرژی ۶۱ درصدی را محقق خواهد ساخت. همچنین میزان مصرف سوخت را ۴۱ درصد و هزینه‌های عملکردی را ۵۵ درصد کاهش می‌دهد. در این حالت دوره‌ی بازگشت سرمایه با در نظر گرفتن نرخ بهره و بدون در نظر گرفتن نرخ بهره به ترتیب برابر ۶ و ۱/۳۶ سال خواهد بود.

کلمات کلیدی

توربین بخار، توربین گاز، تحلیل انرژی، تحلیل انرژی، تحلیل اقتصادی

فهرست:

۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	تاریخچه‌ی سیستم‌های تولید همزمان	۴
۳-۱	محاسن سیستم تولید همزمان	۵
۴-۱	عملکرد سیستم تولید همزمان	۶
۱-۲	مقدمه	۱۲
۲-۲	مروری بر پژوهش‌های گذشته	۱۲
۳-۲	معرفی کار حاضر و فواید استفاده از سیستم تولید همزمان دوگانه (CHP)	۲۱
۱-۳	مقدمه	۲۶
۲-۳	فرایند تولید شکر از چغندر قند	۲۶
۱-۲-۳	کاشت داشت و برداشت چغندر	۲۶
۲-۲-۳	تحويل دادن چغندر قند به کارخانه	۲۷
۳-۲-۳	انتقال چغندر به محل فرآیند	۲۷
۴-۲-۳	شستشوی چغندر	۲۸
۵-۲-۳	تهیه خلال چغندر	۲۸
۶-۲-۳	استخراج قند از خلال	۲۹
۷-۲-۳	تصفیه شربت خام	۳۰
۸-۲-۳	سانتریفوژ	۳۴
۹-۲-۳	مرحله قندسازی	۳۵
۳-۳	مطالعه موردی	۳۶

۳۷	..... ۴-۳ آنالیز انرژی
۳۸	..... ۱-۴-۳ فرضیات
۳۸	..... ۲-۴-۳ آنالیز انرژی سیستم متمرکز (سیستم تولید جداگانه)
۳۹	..... ۳-۴-۳ آنالیز انرژی سیستم تولید همزمان
۴۳	..... ۴-۴-۳ موتور گازسوز
۴۵	..... ۵-۴-۳ توربین گاز
۴۷	..... ۶-۴-۳ توربین بخار
۴۸	..... ۵-۳ آنالیز انرژی
۵۲	..... ۶-۳ آنالیز اقتصادی
۵۳	..... ۱-۶-۳ هزینه‌های احداث و اسقاطی
۵۵	..... ۲-۶-۳ هزینه‌های تعمیر و نگهداری
۵۶	..... ۳-۶-۳ هزینه‌های عملکردی و درصد کاهش هزینه‌های عملکردی
۵۶	..... ۴-۶-۳ درصد کاهش مصرف سوخت
۵۷	..... ۵-۶-۳ دوره‌ی بازگشت سرمایه
۶۰	..... ۱-۴ مقدمه
۶۰	..... ۲-۴ شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار متلب
۶۱	..... ۳-۴ مطالعه‌ی موردی
۶۱	..... ۱-۳-۴ سناریو ۱: توربین بخار
۶۲	..... ۲-۳-۴ سناریو ۲: توربین گاز
۶۳	..... ۳-۳-۴ سناریو ۳: موتور گازسوز
۶۳	..... ۴-۳-۴ سناریو ۴: توربین گاز+ توربین بخار
۶۴	..... ۵-۳-۴ سناریو ۵: موتور گازسوز+توربین بخار

۶۵.....	۴-۳-۶ سناریو ۶: موتور گازسوز+توربین گاز
۶۶.....	۴-۴ ارائه نتایج
۶۶.....	۴-۴-۱ اعتبارسنجی
۶۷.....	۴-۴-۲ نتایج آنالیز انرژی
۷۲.....	۴-۴-۳ نتایج آنالیز انرژی
۷۳.....	۴-۴-۴ نتایج آنالیز اقتصادی
۸۰.....	۵-۱ مقدمه
۸۰.....	۵-۲ جمع بندی نتایج
۸۱.....	۵-۳ پیشنهادها
۸۲.....	مراجع

فهرست اشکال:

- شکل (۱-۱): دسته‌بندی سیستم‌های تولید همزمان [۱۶-۱۸] ۴
- شکل (۲-۱): مقایسه راندمان سیستم تولید همزمان و سیستم‌های متمرکز [۲۱] ۶
- شکل (۳-۱): سیستم تولید مجزا [۲۴] ۷
- شکل (۴-۱): سیستم تولید همزمان [۲۴] ۸
- شکل (۱-۳): کانال انتقال چغندر به مراحل تولید ۲۷
- شکل (۲-۳): نوار انتقال چغندر از سیلو به کانال انتقال چغندر ۲۸
- شکل (۳-۳): نمای خارجی دستگاه شستشوی چغندر قند ۲۸
- شکل (۴-۳): نمای خارجی دستگاه تولید خلال چغندر ۲۹
- شکل (۵-۳): دستگاه دیفیوزن موجود در کارخانه قند و شکر شاهرود ۳۰
- شکل (۶-۳): بخش محرک دستگاه دیفیوزن موجود در کارخانه قند و شکر شاهرود ۳۰
- شکل (۷-۳): کوره آهک موجود در کارخانه قند و شکر شاهرود ۳۱
- شکل (۸-۳): دستگاه تصفیه گل شربت ۳۲
- شکل (۹-۳): دستگاه تغلیظ شربت شکر ۳۳
- شکل (۱۰-۳): آپارات‌های موجود در کارخانه قند و شکر شاهرود ۳۴
- شکل (۱۱-۳): دستگاه سانتریفیوژ ۳۵
- شکل (۱-۴): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۱ ۶۲
- شکل (۲-۴): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۲ ۶۲
- شکل (۳-۴): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۳ ۶۳
- شکل (۴-۴): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۴ ۶۴
- شکل (۵-۴): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۵ ۶۵

- شکل (۴-۶): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۶ ۶۶
- شکل (۴-۷): دیاگرام انرژی کارخانه قند و شکر شاهرود ۶۸
- شکل (۴-۸): شاخص‌های فنی توربین بخار برحسب بار جزئی ۶۹
- شکل (۴-۹): شاخص‌های فنی توربین گاز برحسب بار جزئی ۷۰
- شکل (۴-۱۰): شاخص‌های فنی موتور گازسوز برحسب بار جزئی ۷۰
- شکل (۴-۱۱): نمودار مقایسه راندمان انرژی ۷۱
- شکل (۴-۱۲): نمودار مقایسه راندمان انرژی ۷۳
- شکل (۴-۱۳): نمودار هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و ارزش اسقاطی سیستم تولید همزمان ۷۴
- شکل (۴-۱۵): نمودار هزینه‌های مصرف سوخت و تعمیرات و نگهداری سیستم تولید همزمان ۷۵
- شکل (۴-۱۶): نمودار تغییرات کاهش مصرف سوخت (FESR) برای سناریوهای معرفی شده ۷۶
- شکل (۴-۱۷): نمودار تغییرات کاهش هزینه‌های عملکردی برای سناریوهای معرفی شده ۷۷
- شکل (۴-۱۸): نمودار کاهش دوره‌ی بازگشت سرمایه برای سناریوهای معرفی شده ۷۷

فهرست جداول:

- جدول (۱-۲): ارزیابی و مقایسه‌ی انواع محرک‌های سیستم تولید دوگانه [۲۵-۲۸] ۱۳
- جدول (۱-۳): ظرفیت تولیدی کارخانه قند و شکر شاهرود ۳۶
- جدول (۲-۳): مشخصات فنی محرک های اولیه [۸۰] ۴۳
- جدول (۳-۳): آگزرژی شیمیایی استاندارد گونه‌های مختلف گاز [۷, ۸۹] ۵۱
- جدول (۴-۳): هزینه اولیه‌ی تجهیزات [۲۴, ۸۱] ۵۳
- جدول (۵-۳): هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات [۲۴, ۸۱] ۵۵
- جدول (۱-۴): پارامترهای ورودی نرم‌افزار متلب [۲۴, ۸۲, ۹۷] ۶۰
- جدول (۴-۴): خلاصه نتایج اعتبارسنجی ۶۶

علائم و اختصارات:

		اختصارات
A	Annual Income	درآمد سالانه
C	Cooling load	بار سرمایشی
CC	Capital Cost	هزینه‌ی احداث
CCHP	Combined Cooling, Heating and Power	سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت
CHP	Combined Heating and Power	سیستم تولید همزمان برق و حرارت
COP	Coefficient Of Performance	ضریب عملکرد
CR	Cost reduction	کاهش هزینه‌های عملکردی
E	Electricity demand	بار الکتریکی
Ex	Exergy	اگزرژی
F	Fuel	سوخت
GE	Gas Engine	موتور گازسوز
GT	Gas Turbine	توربین گاز
h	enthalpy	آنتالپی
H	Heating Load	بار حرارتی
i	Interest rate	نرخ بهره
ICE	Internal Combustion Engine	موتور احتراق داخلی
LHV	Low heating value	ارزش پایین سوخت
m	mass flow	نرخ دبی جرمی
M	Maintenance	هزینه‌های تعمیر و نگهداری
n	lifetime of the equipment	طول عمر تجهیزات
NC	capacity of each component	ظرفیت تجهیزات
NPV	Net Present value	ارزش حال خالص
NPWB	Net present worth benefit	ارزش خالص درآمدها
NPWC	Net present worth cost	ارزش فعلی خالص هزینه‌های اولیه
P	Power	توان
PB	Payback Period	دوره‌ی بازگشت سرمایه
PL	Part Load	بار جزئی
PM	Prime Mover	محرك اولیه
Q	Heat transfer rate	نرخ انتقال حرارت
R	Reduce costs	کاهش هزینه‌ها
S	Entropy	آنتروپی
SP	Separate Production	تولید مجزا
ST	Steam turbine	توربین بخار
SV	Salvage value	ارزش اسقاطی

T	Temperature	دما
W	Work	کار
Z	Altitude	ارتفاع
زیرنویس		
ab	Absorption Chiller	چیلر جذبی
b	Electricity buying	خرید برق
B	Boiler	بویلر
Ch	Chiller	چیلر
ex	Exergy	اگزرژی
exh	Exhaust	اگزوز
Exp	Exporting electricity to the network	قیمت فروش برق به شبکه
f	fuel	سوخت
h	heat	حرارت
in	inlet flow	جریان ورودی
nom	Nominal	ظرفیت نامی
oil	Oil cooling	روغن روانکار
out	outlet flow	جریان خروجی
pgu	power generator unit	واحد تولید توان
rec	recovery	حرارت بازیافتی
req	request	حرارت مورد نیاز
s	Electricity selling	فروش برق
y	year	سال
علائم یونانی		
η	Efficiency	راندمان
μ	Electricity sell from the grid factor	قیمت فروش برق
τ	time period	ساعت کارکرد

فصل اول:

مقدمه و معرفی سیستم تولید همزمان

انرژی در حیات اقتصاد صنعتی جوامع، نقش زیر بنائی را ایفا می‌کند، به این معنا که هرگاه انرژی به مقدار کافی و به‌موقع در دسترس باشد توسعه‌ی اقتصادی نیز میسر خواهد بود؛ بنابراین انرژی یکی از بخش‌های عمده‌ی نظام اقتصادی و اجتماعی است و بر فرآیندهای توسعه‌ی اقتصادی به‌طور وسیعی اثر می‌گذارد [۱]. برنامه ریزان دولتی همواره با چالش ارائه شرایط لازم به‌منظور توسعه‌ی کشور، روبرو هستند که انرژی نقش بسیار مهمی در این راستا ایفا می‌کند [۲، ۳]. نگاه به معضلات گذشته نشان می‌دهد که همواره رقابت‌های بزرگی در سطح جهانی بر سر تصاحب انرژی وجود داشته است؛ چرا که امنیت ملی و پایداری نظام‌های حکومتی تا حد زیادی در گرو دسترسی به این منابع است [۴].

استحصال، فرآوری، تبدیل و انتقال انرژی مستلزم بهره‌برداری از منابع طبیعی، انسانی و اقتصادی است و به‌کارگیری انرژی در جامعه، آلودگی محیط‌زیست را به همراه خواهد داشت؛ بنابراین شناخت انرژی و تأثیر آن بر جامعه نقش مهمی در بهبود اوضاع اجتماعی خواهد داشت. انرژی تقریباً یک عامل کلیدی بوده و در زندگی و فعالیت‌های انسان در بخش‌های مختلف، اعم از مسکونی و اقتصادی روزانه‌ی انسان‌ها نقش دارد. با توجه به افزایش قیمت سوخت و کاهش منابع سوخت فسیلی، مدیریت بهینه‌ی منابع انرژی و برنامه‌های کاربردی از اهمیت زیادی برخوردار است [۵]. دقت به این نکته مهم است که هرگز منابع انرژی ایده آل وجود ندارد. اگر واژه‌ی ایده آل یک فن‌آوری کارآمد، سازگار با محیط‌زیست، بدون ریسک و مقرون‌به‌صرفه تعریف گردد، بایستی در تمام نیروگاه‌های تولید توان، مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی در نظر گرفته شود و همچنین تمامی چالش‌ها تحت بررسی ریسک قرار گیرد [۶].

ترکیب سیستم‌های گرمایش و قدرت (CHP)^۱ با استفاده از بازیافت گرمای اتلاف شده از محرک‌های اولیه در محل تولید، باعث افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های مصرف انرژی می‌گردد [۷-۱۰]. استفاده

^۱ Combined Heating & Power

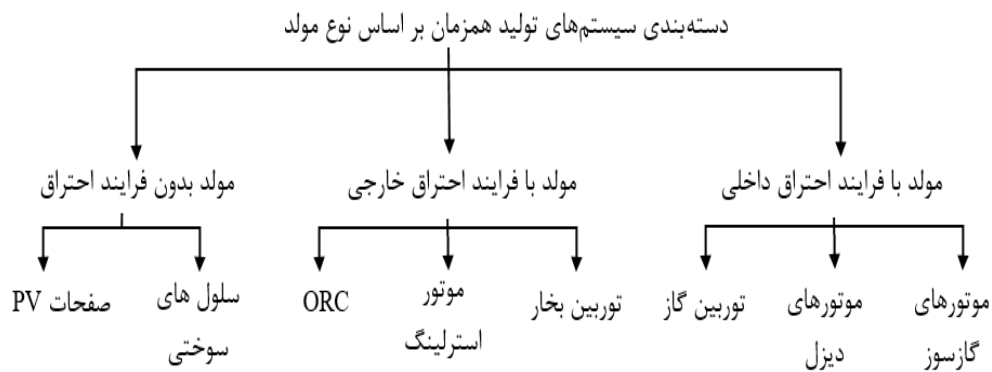
از سیستم‌های تولید همزمان علاوه بر بالابردن راندمان و کاهش مصرف سوخت، باعث کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و همچنین بالا بردن امنیت عرضه‌ی انرژی می‌گردد [۱۱، ۱۲].

یکی از نگرانی‌های قرن ۲۱ میزان محدود منابع سوخت فسیلی است. علاوه بر این، مشکلات زیست‌محیطی سوخت‌ها، نیاز به یافتن راه‌حلهایی جهت مدیریت مصرف این‌گونه منابع را دوچندان می‌کند. یکی از مهم‌ترین راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی باهدف افزایش بازده تولید، بررسی دقیق و بهبود بخشیدن سیکل‌های تولید توان است [۱۳]. به‌طور کلی، تعاملات پیچیده‌ای بین اجزای یک سیستم از جمله جریان جرم، انرژی، انرژی و تحلیل‌های اقتصادی وجود دارد. در بهینه‌سازی، طراح بایستی بهترین روابط بین تعاملات و همچنین مشخصات ساختاری بخش‌های فرعی را بیابد [۵].

در دهه‌های اخیر پس از افزایش عمده‌ی بهای سوخت، اهمیت بحث سوخت جایگزین، افزایش راندمان انرژی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، تمایل به استفاده از فن‌آوری‌های جدید از جمله تولید همزمان برق و حرارت را افزایش داده است. در روش‌های معمول برای تأمین نیازهای الکتریکی و حرارتی، الکتریسیته از شبکه توزیع سراسری و حرارت به وسیله‌ی سوزاندن سوخت در بویلرها و تجهیزات گرمازا تأمین می‌گردد. در این روش انرژی قابل توجهی از طریق گازهای داغ خروجی دودکش، برج‌های خنک‌کن، کندانسورها، خنک‌کننده‌های موتور احتراق داخلی و همچنین تلفات توزیع و انتقال الکتریسیته در شبکه سراسری به هدر می‌رود. بیشتر این اتلافات قابل بازیافت است و می‌تواند در تأمین انرژی حرارتی مجدداً مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل این سیستم‌های تولید مجزا، روش‌های تولید همزمان با استفاده از فن‌آوری ترکیب تولید همزمان برق و حرارت قرار دارد. راندمان سیستم‌های معمول به روش مجزا در حدود ۲۷ تا ۵۵٪ است که بیشترین مقدار مربوط به نیروگاه‌های سیکل ترکیبی است، درحالی‌که با بهره‌گیری از فن‌آوری تولید همزمان برق و حرارت به صورت همزمان، راندمان انرژی این مولدها تا حدود ۹۰٪ نیز خواهد رسید. اهمیت این موضوع تا حدی بوده که دولت‌های اروپائی، آمریکایی و حتی در کشورهای آسیایی نظیر ژاپن، سیاست‌ها و قوانینی را برای ترغیب به استفاده از سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت وضع نموده‌اند. از مهم‌ترین این سیستم‌های تولید

همزمان می‌توان به سیستم‌های تولید همزمان با محرک‌های توربین گاز، میکرو توربین‌ها، موتورهای احتراق داخلی گازسوز و دیزل، موتور استرلینگ، توربین بخار، سلول‌های سوختی و کلکتورهای خورشیدی اشاره نمود [۱۴، ۱۵].

سیستم‌های تولید همزمان را بر اساس نوع محرک‌های اولیه می‌توان به سه دسته‌ی مجزا تقسیم نمود. شکل (۱-۱) این دسته‌بندی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم‌های تولید همزمان بر اساس عملکرد محرک‌های اولیه به دسته‌های احتراق داخلی، احتراق خارجی و بدون فرایند احتراق دسته‌بندی شده است [۱۶-۱۸].



شکل (۱-۱): دسته‌بندی سیستم‌های تولید همزمان [۱۶-۱۸]

۲-۱ تاریخچه‌ی سیستم‌های تولید همزمان

سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت در سال‌های ۱۸۸۰ تا ۱۸۸۲ میلادی در اروپا و در اوایل قرن بیستم در آمریکا و عمدتاً در کارخانجات صنعتی که برق مورد نیاز خود را با استفاده از دیگ‌های زغال‌سوز و ژنراتورهای توربین بخار تولید می‌کردند، مورد استفاده قرار گرفت. در سده‌ی ۱۹۰۰ در آمریکا، حدود ۵۸٪ از کل توان تولید شده در نیروگاه‌ها در محل نیاز به شکل تولید همزمان تولید می‌شد [۱۹].

پس از احداث شبکه‌های برق مرکزی قابل اطمینان، هزینه‌های خرید و انتقال برق به شدت کاهش یافت. بدین ترتیب کارخانجات و مصرف‌کنندگان صنعتی ترجیح دادند برق مورد نیاز خود را از شبکه‌های

سراسری دریافت و تولید برق خود را متوقف کنند. از این رو استفاده از سیستم‌های تولید همزمان به ۵٪ تنزل یافت. قانونمند شدن تولید برق، سهم ناچیز هزینه‌های خرید برق از شبکه سراسری و کاهش هزینه‌های جاری کارخانه‌ها، بهبود راندمان دیگ‌های بخار نیروگاه‌ها، دسترسی ساده به سوخت‌های مایع و گاز و نبود محدودیت‌های زیست محیطی از جمله‌ی مهم‌ترین عوامل کاهش استفاده از سیستم‌های تولید همزمان بود [۲۰].

پس از آن، محدودیت‌های زیست محیطی و بهبود راندمان توربین‌های گازی با ظرفیت پایین (۱ تا ۴۰ مگاوات) باعث شد در ابتدای سال‌های ۱۹۸۰ مجدداً کاربرد سیستم‌های CHP مطرح گردد. توربین‌های گازی باکیفیت، حرارت خروجی بالا تولید می‌نمود که به عنوان محرک اولیه در سیستم‌های CHP باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش بازده می‌شد [۱۵].

۳-۱ محاسن سیستم تولید همزمان

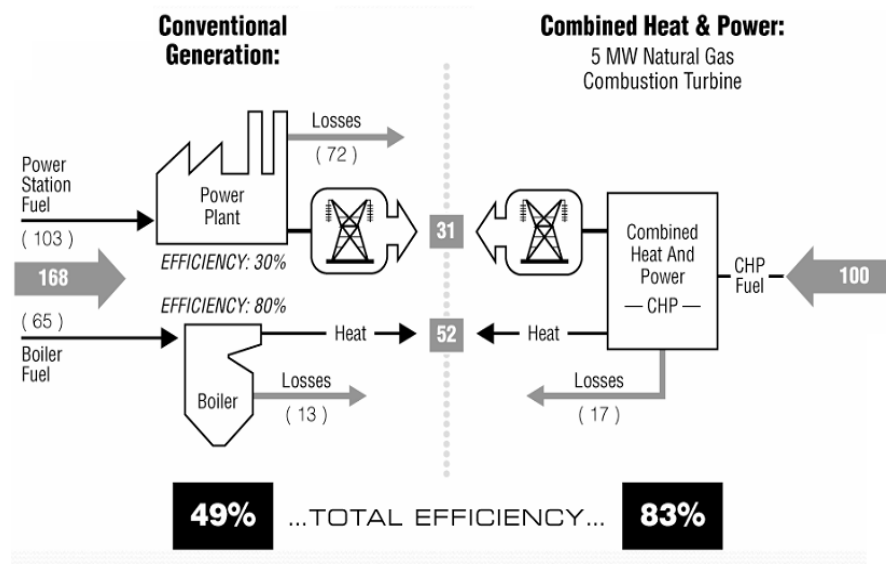
- ۱- افزایش بهره‌وری سوخت ورودی از ۳۰٪ به بیش از ۷۰٪
- ۲- امکان واگذاری به بخش خصوصی و سهولت تأمین مالی
- ۳- افزایش ۵ برابری امنیت در حملات تروریستی و نظامی و توسعه پدافند غیرعامل
- ۴- کاهش نیاز به احداث ظرفیت‌های جدید پست‌های توزیع برق در حالت پرباری شبکه
- ۵- تخصیص کمتر زمین برای احداث شبکه و کاهش سرمایه گذاری مالی، اجتماعی و

زیست محیطی

۶- در روش مجزا، افزایش ۳۰ درصدی بار در اوج مصرف نسبت به متوسط بار شبکه سراسری، تلفات انتقال و توزیع را چندین برابر می‌سازد که با استفاده از سیستم تولید همزمان این تلفات به صفر خواهد رسید.

۷- چنانچه تلفات انرژی از شبکه انتقال و توزیع ۱۸٪ باشد تلفات توان در زمان اوج مصرف برابر ۳۰٪ خواهد بود؛ یعنی از ۴۰ هزار مگاوات برق تولیدی در زمان اوج مصرف ۲۸ هزار مگاوات توان به بار می‌رسد [۱۵].

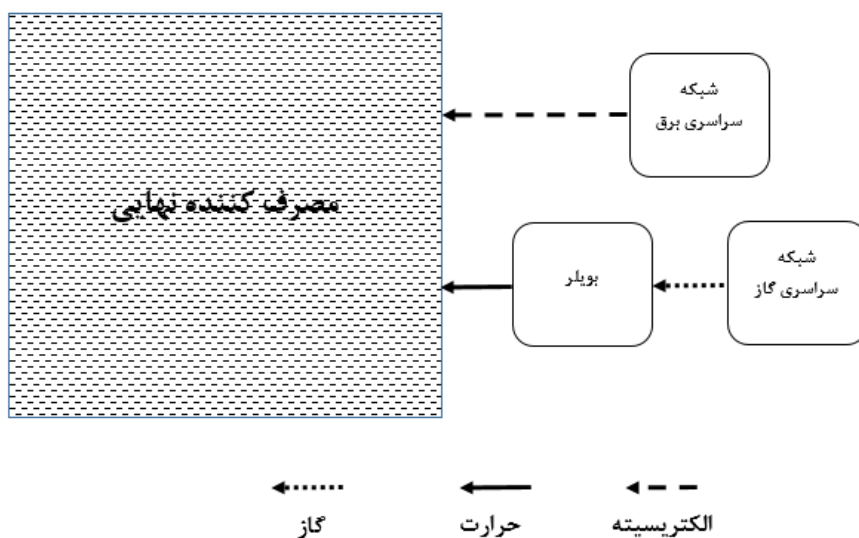
همان‌طور که در شکل (۲-۱) مشاهده می‌شود سیستم تولید همزمان بیشترین راندمان را در مصرف انرژی سوخت دارد؛ متوسط راندمان یک مولد برق در حدود ۳۰٪ و متوسط راندمان یک بویلر حدود ۸۰٪ است. در حالی که یک سیستم تولید همزمان با تولید همزمان برق و حرارت راندمانی بیش از ۷۵٪ دارد؛ یعنی راندمان تولید توان حدود ۳۱٪ و راندمان تولید حرارت حدود ۵۲٪ است. از طرف دیگر در مقایسه با سیستم‌های تولید برق و حرارت مشابه رایج که به صورت مجزا هستند در حدود ۴۰٪ مصرف سوخت کاهش می‌یابد [۲۱].



شکل (۲-۱): مقایسه راندمان سیستم تولید همزمان و سیستم‌های متمرکز [۲۱]

۴-۱ عملکرد سیستم تولید همزمان

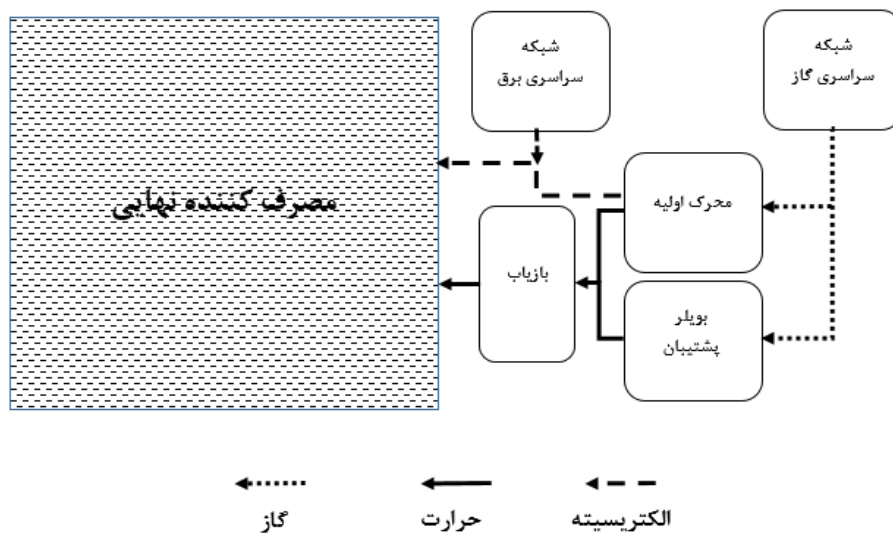
شکل (۳-۱) تأمین انرژی گرمایشی و سرمایشی و نیاز برق ساختمان را به روش مجزا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برق مورد نیاز روشنایی و تجهیزات مجموعه به صورت مستقیم از شبکه‌ی سراسری خریداری می‌گردد. نیاز گرمایشی جهت گرمایش فضا و تأسیسات نیز از طریق کویل گرمایشی و با سوزاندن گاز طبیعی خریداری شده از شبکه در بویلر تأمین می‌گردد [۲۲، ۲۳].



شکل (۳-۱): سیستم تولید مجزا [۲۴]

شکل (۴-۱) سیستم‌های تولید همزمان رایج را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در حالت استفاده از این نوع ترکیب، محرک اولیه یا واحد تولید قدرت، سوخت خریداری شده از شبکه‌ی سراسری گاز را سوزانده و انرژی مکانیکی تولید می‌کند. ژنراتور کوپل شده با محرک اولیه، انرژی مکانیکی تولید شده توسط محرک اولیه را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. به این ترتیب برق مورد نیاز مجموعه تأمین می‌گردد.

در صورتی که برق تولید شده توسط مولد سیستم تولید همزمان کمتر از نیاز مجموعه باشد، برق مازاد مورد نیاز از شبکه‌ی سراسری برق تأمین می‌گردد. همچنین یک سیستم بازیاب گرما با محرک اولیه کوپل شده است. واحد بازیاب، گرمای اتلافی از محرک اولیه را جذب کرده و حرارت بازیافت شده توسط واحد بازیافت گرما به عنوان منبع گرمایی در جهت تأمین نیاز بار گرمایشی و یا تولید آبگرم مصرفی در طول سال مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳].



شکل (۴-۱): سیستم تولید همزمان [۲۴]

در این پژوهش با توجه به اهمیت انرژی و توصیف سیستم تولید همزمان سعی شده است تا عملکرد این سیستم بهبود یابد. از این رو:

◀ در فصل اول به معرفی و اهمیت انرژی و مزایای سیستم تولید همزمان پرداخته شد. همچنین سیستم تولید همزمان به طور کامل تشریح گردید.

◀ در فصل دوم به بررسی پژوهش‌های افرادی که در زمینه‌ی سیستم‌های تولید همزمان گام‌های مثبتی برداشته‌اند اشاره شده است. در انتهای فصل دوم نکات مغفول مانده و اهمیت انجام پژوهش حاضر ذکر شده است و ترکیب پیشنهادی جدیدی برای سیستم تولید همزمان معرفی شده است.

◀ در فصل سوم یک سیستم تولید همزمان متناسب با کاربری مجموعه انتخاب و از دیدگاه انرژی، انرژی و اقتصادی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

◀ همچنین در فصل چهارم نتایج حاصل از تحلیل‌های انرژی، انرژی و اقتصادی آورده شده است.

◀ در نهایت در فصل پنجم به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی کلی سیستم مورد نظر پرداخته

شده است و پیشنهادهایی در جهت بهبود عملکرد کارخانه قند شاهرود ارائه شده است.

فصل دوم:

مروری بر کارهای پیشین

۲-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا بخشی از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی سیستم‌های تولید همزمان مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم‌های تولید همزمان پرداخته شده است. در انتهای فصل نکات مغفول در کارهای پیشین به عنوان مبنای پژوهش حاضر معرفی شده و فواید ترکیب سیستم تولید همزمان به عنوان سیستم تأمین کننده‌ی تقاضای برق و حرارت در مجموعه‌ی کارخانه قند شاهرود تشریح شده است.

۲-۲ مروری بر پژوهش‌های گذشته

تاکنون فن‌آوری‌ها و ترکیب‌های گوناگون گرمایش و تولید قدرت در سیستم‌های تولید همزمان توسط افراد مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. این فن‌آوری‌ها مطابق با نیاز مجموعه، مورد بررسی قرار می‌گیرد یکی از پارامترهایی که معیار انتخاب قرار می‌گیرد ظرفیت مورد نیاز و نوع کاربری مجموعه است. سیستم‌های تولید همزمان را بر اساس نوع محرک اولیه می‌توان به دسته سیستم‌های تولید همزمان با محرک اولیه‌ی احتراق داخلی، احتراق خارجی و محرک‌های اولیه بدون احتراق تقسیم نمود [۱۷، ۱۸]. بعضی از این فناوری‌ها به دلیل سادگی و گستردگی در بازار بیش از سایر محرک‌های اولیه تجاری‌سازی شده است که موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های بخار و توربین‌های گاز از این دسته‌اند. جدول (۲-۱) مزایا و معایب این محرک‌ها را به عنوان محرک اولیه‌ی سیستم تولید همزمان نشان می‌دهد.

جدول (۱-۲): ارزیابی و مقایسه‌ی انواع محرک‌های سیستم تولید دوگانه [۲۵-۲۸]

موتورهای اولیه‌ی سیستم تولید همزمان	موتورهای رانکین	توربین‌های گاز	موتورهای رفت و برگشتی
مزایا	انعطاف‌پذیری بالا طراحی ساده دما و فشار طراحی پایین قابلیت استفاده با انواع سوخت‌ها	طراحی فشرده و انعطاف‌پذیر نیاز به نگهداری و تعمیرات کم دمای خروجی متوسط و مناسب	راندمان بالا انعطاف‌پذیری بالا راه‌اندازی سریع
معایب	راندمان الکتریکی نسبتاً پایین مناسب برای زمینه‌های تجاری	عملکرد نامناسب در بار جزئی برای استفاده‌ی نامتناوب نامناسب است	تعداد زیادی از قطعات متحرک ارتعاش مکانیکی بالا و سطح سروصدای بالا نرخ بالای انتشار آلاینده‌ها
ظرفیت راندمان تولید برق راندمان تولید همزمان طول عمر (ساعت) نوع سوخت مصرفی دمای حرارت اتلافی (1C) ظرفیت حرارت خروجی (kJ/kWh) بازده در بار جزئی زمان شروع به کار سطح صدای تولیدی هزینه‌ی احداث (\$/kWe)	تا ۲۵۰ مگاوات ۱۵-۳۸٪ ۸۰٪ ۳۰۰۰۰-۵۰۰۰۰ هر نوع سوخت شامل گاز طبیعی و سوخت‌های زیستی تا ۱۰۰۰	تا ۲۵۰ مگاوات ۱۸-۳۶٪ ۶۵-۷۵٪ ۵۰۰۰-۴۰۰۰۰ گاز طبیعی، پروپان، بیوگاز، نفت سبک ۳۵۰-۱۲۰	تا ۷۵ مگاوات ۲۵-۴۵٪ ۶۵-۸۰٪ ۲۰۰۰۰-۵۰۰۰۰ دیزل، گاز طبیعی، پروپان، بیوگاز، گاز حاصل از زباله ۲۰۰-۸۰
	۱۰۶۵-۵۲۷۵۳	۳۳۷۶-۷۱۷۴	۳۳۷۶-۵۹۰۸
	متوسط حدود ۱ ساعت	پایین حدود ۱۰ دقیقه	بالا حدود ۱۰ ثانیه
	متوسط متوسط	متوسط متوسط	بالا بالا
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۴۵۰-۱۵۰۰	۳۴۰-۱۶۰۰

احمدی و همکاران به تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی و بهینه‌سازی ترمودینامیکی چند هدفه از یک نیروگاه گازی [۵] و طراحی بهینه پارامترهای عملیاتی نیروگاه سیکل ترکیبی با استفاده از یک الگوریتم عمومی (GA) با کمک روش اقتصادی پرداختند [۲۹]. متغیر طراحی آن‌ها تنها نسبت فشار و دمای ورودی توربین گاز بود که در نهایت تأثیر بر روی بازده نیروگاه و اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی نیروگاه را بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با انتخاب مجموعه‌ی پارامترهای طراحی بهینه، منجر به کاهش ۵۰ درصدی اثرات زیست‌محیطی می‌گردد [۵]. علاوه بر این، موارد مختلفی برای تعیین

کاهش تابع هدف (هزینه، آهنگ شارش جرم و غیره) برای طراحی و عامل پارامترهای بهینه‌سازی (هزینه سوخت، توان خروجی و غیره) یافتند [۲۹].

باروس و همکاران [۳۰] با بهره‌گیری از شبیه‌سازی مدل ریاضی و تحلیل سلسله مراتبی به تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی انواع نیروگاه‌ها پرداختند. آن‌ها دو نوع نیروگاه با سوخت فسیلی و نیروگاه‌های تجدیدپذیر را مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نیروگاه‌های تجدیدپذیر تنها تحت شرایط خاصی می‌تواند با نیروگاه‌های تجدید ناپذیر رقابت کند که بیشتر وابسته به سیاست‌های برنامه‌ریزی انرژی و دولتی می‌باشد.

هندشل و همکاران [۳۱] از یک روش ارزیابی توسعه داده شده استفاده کردند که به کاربر اجازه می‌دهد ارتباط بین تغییر پارامترهای فنی و اقتصادی ممکن را به راحتی بیابد. آن‌ها به کمک این روش چهار نوع مختلف از نیروگاه‌های معمولی با سوخت زغال‌سنگ را در حالت افزایش CO₂ و قیمت سوخت به منظور تعیین تأثیرگذاری در گزینه‌های انعطاف‌پذیری مختلف، مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که با تغییر پارامترهای انعطاف‌پذیر، میزان نرخ رشد اقتصادی در حداقل بار عملیاتی مثبت است.

الجندی [۳۲] به تجزیه و تحلیل همزمان انرژی و انرژی در یک نیروگاه بخار در اردن پرداخته است. اهداف اصلی در این بررسی شامل مشخص کردن پارامترها، برای حداکثر نمودن راندمان انرژی و حداقل نمودن میزان تخریب انرژی می‌باشد. وی بیشترین تخریب انرژی را در سیستم دیگ بخار به میزان ۷۷٪ و پس از آن توربین به میزان ۱۳٪ و کندانسور ۹٪ دانسته است.

پارک و همکاران [۳۳] به بررسی هزینه‌های انرژی (COE)^۱ برای چند نیروگاه با سوخت فسیلی پرداختند. نیروگاه‌های مورد بررسی آن‌ها شامل نیروگاه گازی یکپارچه با سیکل ترکیبی (IGCC)^۲،

^۱ Cost of Energy

^۲ Integrated gasification combined cycle

نیروگاه سیکل گاز طبیعی ترکیبی (NGCC)^۱ و نیروگاه با سوخت زغال سنگ ساییده (PC)^۲ بود. در این مطالعه آن‌ها از (LCOEs)^۳ اصلاح شده بر اساس سناریوهای تغییر آب و هوا استفاده نمودند که تغییرات در قیمت سوخت و تغییرات CO₂ با توجه به حالات مختلف، به منظور افزایش قابلیت اطمینان از مقایسه اقتصادی در حال ظهور، نیروگاه‌های فسیلی بررسی شد. علاوه بر این، از برنامه‌ریزی انرژی در جهت ارائه کاربرد روش محاسبه پیشنهادی برای COE استفاده نمودند. نتایج آن‌ها با توجه به تجزیه و تحلیل حساسیت بیانگر این موضوع بود که عملیات CCS^۴ مقرون به صرفه با طول عمر زمانی ۲۰ ساله به ازای کاهش هزینه متوسط CO₂ بالاتر از ۸۰ دلار بر تن بوده است.

در کشور ایران بخش عمده‌ای از توان تولیدی توسط نیروگاه‌های بخار تولید می‌شود به گونه‌ای که ۳۵ درصد توسط نیروگاه‌های بخار، ۲۴/۵ درصد توسط نیروگاه‌های گازی، ۲۳/۵ درصد توسط نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و ۱۶/۹ درصد توسط نیروگاه‌های آبی تولید می‌گردد. به همین سبب تحقق و بهینه‌سازی سیکل‌های بخار به دلیل قدیمی بودن طراحی برخی نیروگاه‌ها (عدم تطابق با فناوری روز) و بیشترین سهم آن‌ها در تولید برق ایران، قابل توجه است. آنالیز انرژی همراه با قانون اول و دوم ترمودینامیک، این امکان را فراهم می‌سازد که روش مطلوب برای تحلیل سیستم‌های تبدیل انرژی و همچنین شناخت سطوح انرژی و فرایندهای نامطلوب ترمودینامیکی سیستم‌های انرژی را بتوان یافت. از این رو آزادانی و احمدی به تحلیل و بررسی نیروگاه سیکل بخار پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد بیشترین تخریب انرژی در بویلر رخ می‌دهد [۳۴].

همچنین احمدی و همکاران [۳۵] یک نیروگاه بخار را در پالایشگاه نفت مورد بررسی قرار دادند. سیستم مورد بررسی آن‌ها شامل ژنراتور بخار، توربو ژنراتور و یک شبکه تولید و توزیع بخار جهت

¹ Natural gas combined cycle

² Pulverized Coal

³ Low cost of Energy

⁴ Carbon capture and sequestration

فرایندها بود که تحت سیستم CHP مورد تحلیل انرژی، انرژی و زیست محیطی قرار گرفت. نتایج آنها بیانگر میزان انرژی، انرژی، گرما و راندمان کل به ترتیب برابر ۸/۲۲، ۷/۸۷، ۴۸/۹۲ و ۵۶/۸ درصد بود. بر اساس نتایج بدست آمده بیشترین میزان تخریب انرژی مربوط به بویلرها، ایستگاه‌های کاهش فشار بخار (HPS / MPS-MPS / LPS) و توربو ژنراتورها است.

عبدالله و ناصر [۳۶] به بررسی پارامترهای واقعی و تاثیر گذار یک نیروگاه خورشیدی-بخار پرداختند. هدف آن‌ها دست‌یابی به مدل واقعی برای توربین‌های فشار بالا، متوسط و پایین بود. همچنین گنک و گنک [۳۷] به بررسی یک سیکل ترکیبی شامل سیکل توربین گاز، سیکل جیوه و سیکل بخار پرداختند. آنها پارامترهای متغیر را از نظر انرژی و انرژی مورد بررسی قرار دادند.

از آنجایی که نوع سوخت مورد استفاده در محرک‌های اولیه‌ی سیستم‌های تولید همزمان بر میزان حرارت بازیافتی، توان خروجی و راندمان تأثیرگذار است، آیالا و همکاران [۳۸] به مطالعه‌ی تأثیرات استفاده از چندین نوع سوخت گاز طبیعی، دیزل، اتانول و سوخت زیستی در توربین‌های گازی پرداختند. همچنین کاوازو و همکاران [۳۹] به تجزیه و تحلیل یک میکرو توربین گاز با انواع سوخت‌های ترکیبی روغن‌های گیاهی و گازوییل پرداختند. آن‌ها عملکرد توربین گاز و میزان انتشار آلاینده‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. یاسر [۴۰] به بررسی یک موتور جت توربین گاز در مقیاس کوچک در ۴ نوع بار مختلف پرداخت. وی عملکرد توربین گاز را در حالت آماده به کار، بار کامل و در دو حالت بار جزئی، از نظر انرژی و انرژی مورد بررسی قرار داد. پارامترهای هدف شامل مصرف انرژی، کاهش مصرف سوخت، کاهش تخریب انرژی، مصرف انرژی نسبی و بهبود انرژی بود. کیم و همکارش [۴۱] نیز در تحقیقی به بررسی ویژگی‌های عملکرد توربین گاز در شرایط بار جزئی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد افزایش دمای ورودی به توربین باعث افزایش بهره‌وری کلی سیستم می‌گردد.

در راستای اهمیت موضوع انرژی و اجرای سیستم‌های تولید همزمان، گائو [۴۲] در یک کار تحقیقاتی سیستم‌های تولید همزمان را مورد مطالعه قرار داد. تجزیه و تحلیل‌های او، صرفه‌جویی ۳۷ درصدی

انرژی را نسبت به سیستم‌های تولید مجزا نشان می‌دهد. لیو و همکاران [۴۳] نیز به بررسی سیستم‌های تولید همزمان و معرفی محرک‌های اولیه و حرارت اتلافی در سیستم تولید همزمان پرداختند. همچنین جرادی و همکاران [۱۴] تمامی محرک‌های اولیه و سیستم‌های سرمایشی که قابلیت کار در یک سیستم تولید همزمان را دارند، مورد بررسی قرار دادند. تنگ و همکاران [۴۴] نیز نقش ظرفیت توربین گاز را به عنوان محرک اولیه‌ی سیستم تولید همزمان مهم دانستند. از این‌رو یک روش ساده برای تعیین ظرفیت بهینه‌ی توربین گاز معرفی نمودند.

کاراپلوچی و گیاردانا [۴۵] به بررسی انرژی و ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی برای یکپارچه‌سازی توربین گاز در یک نیروگاه ۶۰۰ مگاواتی با سوخت زغال‌سنگ پرداختند. توکانلو و همکاران [۴۶] سیستم‌های ترکیبی خنک‌کننده حرارت و قدرت را به طور موردی برای انتاریو کانادا مورد بررسی قرار دادند. سیستم تحلیلی آن‌ها شامل محرک اولیه‌ی توربین گاز با سوخت گاز طبیعی بود.

کلنا و گابریلا [۴۷] یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه را برای کاربری صنعتی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. آن‌ها موتور احتراق داخلی را به عنوان محرک اولیه در نظر گرفتند و با ثابت بودن محرک اولیه به بررسی سیستم سرمایه‌ش پرداختند.

جوان و همکاران [۴۸] به مدل‌سازی فنی-اقتصادی جامع و بهینه‌سازی چند منظوره یک سیستم تولید همزمان برای استفاده‌ی مسکونی پرداختند. محرک اولیه‌ی آن‌ها یک موتور احتراق داخلی بود که گرمای بازیافتی از ژاکت خنک‌کننده و گازهای خروجی برای استفاده در سیکل رانکین پیشنهاد شد. کنگ و همکاران [۴۹] توربین‌های گاز را به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در مصرف انواع سوخت‌ها، برای استفاده از بیوگاز در سیستم تولید همزمان مناسب دانستند. بررسی آن‌ها شامل ترکیب توربین گاز ۵ مگاواتی با توربین بخار و ایجاد سیکل ترکیبی و همچنین استفاده از حرارت خروجی توربین گاز و استفاده به عنوان سیستم تولید همزمان تحت دو سناریو بود. همچنین رومان و همکاران [۵۰] به بررسی سه نوع محرک اولیه برای یک سیستم تولید همزمان پرداختند. آن‌ها محرک‌های موتور احتراق داخلی، میکرو توربین و سلول سوختی را مورد تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی قرار دادند. آن‌ها موتور

احتراق داخلی و میکرو توربین را برای سیستم تولید همزمان مناسب دانستند. نتایج آن‌ها برای سیستم تولید همزمان بیانگر کاهش تولید گازهای آلاینده و صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای هر دو مولد بود. چهارطاقی و شیخی [۵۱] یک سیستم تولید همزمان را با محرک اولیه‌ی موتور استرلینگ مورد بررسی قرار دادند. تابع هدف آن‌ها کاهش مصرف سوخت و میزان تولید آلاینده‌ها بود. نتایج آن‌ها کاهش ۳۷ درصدی مصرف سوخت و کاهش ۴۲ درصدی میزان تولید آلاینده‌ها را نسبت به سیستم‌های مجزا نشان می‌دهد. همچنین چهارطاقی و علیزاده [۵۲] عملکرد یک سیستم تولید همزمان را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. سیستم تولید همزمان مورد بررسی توسط آن‌ها شامل یک سلول سوختی PEM، یک چیلر جذبی، یک پمپ، یک کمپرسور و یک مخزن ذخیره‌ساز گرما بود که از دیدگاه‌های انرژی، انرژی و صرفه‌جویی در مصرف سوخت (FESR) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج سیستم پیشنهادی آن‌ها نشان‌دهنده‌ی راندمان انرژی برابر ۸۱٪، راندمان انرژی ۵۴٪ و صرفه‌جویی مصرف سوخت ۴۵ درصدی است.

مزایای استفاده از میکرو توربین‌های گازی در مقیاس کوچک در سیستم‌های تولید همزمان، نیک‌پی و همکاران [۵۳] را بر آن داشت تا به تحقیق و تفحص بر روی میکرو توربین‌های گاز بپردازند. لی و همکاران [۵۴] نیز به مقایسه‌ی دو محرک اولیه‌ی موتور گازسوز و توربین گاز از لحاظ مصرف انرژی در یک سیستم تولید همزمان CCHP پرداختند.

در زمینه‌ی هیبریدی و ترکیب سیستم‌های تولید همزمان نیز چندین پژوهش انجام شده است. برای نمونه، عباسی و همکاران [۵۵] ترکیب همزمان موتور گازسوز و توربین گاز را به عنوان محرک اولیه‌ی سیستم تولید همزمان مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب محرک‌های اولیه باعث افزایش راندمان تا ۸۷٪ و در بهترین شرایط کاهش هزینه‌های عملکردی ۸۰ درصدی می‌گردد. همچنین کورو و همکاران [۵۶] یک نمونه سیستم نیروگاهی هیبریدی را به صورت تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها سیستم هیبریداسیون را یکی از مهم‌ترین عوامل در کاهش هزینه‌ها و افزایش عملکرد

سیستم تولید قدرت دانستند. سیستم مورد نظر آن‌ها شامل هیبرید سیستم خورشیدی و توربین گاز بود که به عنوان اولین سیستم ترکیبی خورشیدی با توربین گاز در مقیاس مگاوات معرفی شده است. سرکیس و زارع [۵۷] دو سیستم تولید قدرت هیبریدی با سوخت زیست‌توده و سیستم‌های خورشیدی در راستای تولید توان به همراه توربین گاز را مورد بررسی قرار دادند. همچنین سیستم آن‌ها با چرخه رانکین همراه بود. آن‌ها سیستم پیشنهادی را از دیدگاه انرژی، انرژی و اقتصادی با سایر سیستم‌های متعارف استاندارد مقایسه کردند.

انصاری نصب و مهرپویا [۵۸] یک سیستم CCHP را با ترکیب سلول سوختی کربنات مولد (MCFC)، توربین گاز و موتور استرلینگ پیشنهاد دادند. گرمای بازیافتی از سلول سوختی برای موتور استرلینگ و یک چیلر جذبی برای تأمین نیازهای قدرت و سرمایش مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها برای ارزیابی عملکرد سیستم CCHP تحلیل‌های انرژی و اقتصادی انجام دادند. علاوه بر این، برای بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های سیستم، سه استراتژی برای افزایش راندمان اجزا و بهینه‌سازی ساختار کلی سیستم ارائه نمودند.

وانگ و همکاران [۵۹] یک سیستم CCHP با ترکیب توربین گاز و کلکتورهای خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز انرژی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به منظور ارزیابی عملکرد سیستم، مدل‌های ترمودینامیکی برای اجزای سیستم انجام دادند و تأثیر پارامترهای اصلی عملکرد مانند دمای ورودی و فشار توربین، نسبت فشار کمپرسور و اثربخشی مبدل‌های حرارتی بر راندمان سیستم را بررسی نمودند. در نهایت آن‌ها به کمک نرم‌افزار MATLAB بهینه‌سازی چند هدفه از سیستم را بر اساس راندمان اضافی و هزینه سرمایه‌گذاری سیستم ارائه دادند.

ژانگ و همکاران [۶۰] یک سیستم CCHP با موتور احتراق داخلی (ICE) را به عنوان محرک اولیه‌ی همراه سیستم خورشیدی بررسی نمودند. انرژی خورشیدی در فرایند تولید بیوگاز مورد استفاده قرار گرفت. بیوگاز سوخت اصلی ICE بود و گاز خروجی از طریق تأمین آب سرد و گرم از طریق چیلر جذبی و مبدل حرارتی مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها به تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم

پرداختند و پارامترهای نسبت مصرف انرژی اولیه و هزینه کل سالانه سیستم را محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که در سیستم پیشنهادی نسبت صرفه‌جویی انرژی اولیه و هزینه کل سالانه بیشتر از سیستم‌های تولید مجزا است.

همچنین، وانگ و همکاران [۶۱] یک سیستم جدید CCHP با توربین گاز و یک زیرسیستم جهت تولید توان حرارت و برودت معرفی نمودند. آن‌ها به تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی سیستم CCHP پرداختند و نسبت راندمان انرژی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی را با سیستم‌های CCHP معمولی با توربین گاز مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بازده انرژی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی نسبت به سیستم معمولی بالاتر است و بنابراین سیستم آن‌ها می‌تواند به طور عملی مفید باشد.

گائو و همکاران [۶۲] با توجه به اتلافات حرارتی محرک‌های اولیه سیستم‌های تولید همزمان را از نظر سطح انرژی و انرژی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. گنگ و همکاران [۶۳] نیز یک ترکیب جدید برای سیستم تولید همزمان پیشنهاد دادند. آن‌ها یک واحد تولید قدرت، یک پمپ زمین‌گرمایی، یک چیلر جذبی و یک مخزن ذخیره‌سازی گرما را ترکیب نمودند. محمدی و همکاران [۶۴] با توجه به عملکرد بهتر و راندمان بالاتر سیستم‌های هیبریدی، در سال ۲۰۱۷ یک سیستم هیبریدی شامل یک توربین گاز و یک چرخه‌ی ORC را برای کاربری مسکونی مورد تحلیل قرار دادند.

وی [۶۵] پس از انرژی‌های تجدید پذیر مانند برق‌آبی، انرژی خورشیدی، باد، زیست‌توده و غیره، متان (CH₄) را به عنوان تمیزترین منبع انرژی در میان سوخت‌های فسیلی برشمرد. با توجه به روند استفاده از این نوع سوخت و اهمیت استفاده‌ی مناسب از این سوخت در راستای کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، وی سیستم‌های هیبریدی توربین گاز و سلول سوختی کربنات مذاب را به عنوان منابع انرژی پراکنده مورد مطالعه قرارداد. این نوع سیستم‌های هیبریدی با توجه به راندمان بالاتر برق مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از سلول‌های سوختی کربنات مذاب می‌توان به برق با کیفیت و با ثبات و با راندمان حدود ۴۷ درصدی دست یافت. نتایج استفاده از این نوع سیستم، افزایش بهره‌وری ۱۰ تا ۳۰ درصدی را نسبت به سیستم‌های سنتی نشان می‌دهد. گُرو و همکاران [۶۶] تجزیه و تحلیل

ترمودینامیکی یک چرخه توربین گاز و موتور استرلینگ را مورد بررسی قرار دادند. بررسی آن‌ها متمرکز بر روی محرک‌های توربین و موتور استرلینگ بود.

همچنین افرادی به صورت تخصصی بر روی روش تأمین انرژی کارخانه‌های قند و شکر تحقیق نموده‌اند. برای مثال راتو [۶۷] به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و منابع جایگزین انرژی در کارخانه‌های شکر اشاره نمود. همچنین تانر [۶۸، ۶۹] به بهره‌وری و مدیریت انرژی و تجزیه و تحلیل اقتصادی کارخانه قند پرداخته است. گنجه کویری و همکاران [۷۰] نیز به تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی با بهینه‌سازی چند هدفه پرداختند و به منظور تعیین برگشت ناپذیری در هر بخش از سیستم CHP و ارزیابی عملکرد سیستم، یک مطالعه کامل پارامتری انجام دادند. ایبارا و مدلین [۷۱] با استفاده از مفاهیم جدید در تجزیه و تحلیل انرژی فرآیندهای صنعتی با در نظر گرفتن ترکیب گرمایی تجهیزات فرآیند، تجزیه و تحلیل حرارتی برای یک کارخانه قند در مکزیک را بررسی نمودند. این تحقیق که بر اساس ایجاد تغییرات در استفاده از بخار موجود در فرآیند و تغییر پارامترهای عملیاتی ایستگاه تبخیری کارخانه قند است، موجب کاهش مصرف سوخت به میزان ۷۵ درصد و افزایش تولید برق به میزان ۴۱ درصد شد. همچنین آربانیس [۷۲] به شناسایی مشکلات، طراحی و اجرای اقدامات صرفه‌جویی انرژی در کارخانجات قند پرداخته است.

۲-۳ معرفی کار حاضر و فواید استفاده از سیستم تولید همزمان دوگانه (CHP)

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که کارخانجات قند و شکر از مهم‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی محسوب می‌گردند که در اولویت بندی صنایع انرژی بر دسته بندی شده‌اند. با توجه به اینکه میزان مصرف انرژی در این صنعت در کشور ایران، ۲ برابر میانگین نرخ جهانی است بهبود دانش و تکنولوژی در راستای تأمین نیازهای برق و حرارت این صنعت اهمیت می‌یابد.

سهم بالای صنعت قند و شکر از انرژی مصرفی کشور و کمبود مدارک و مطالعات فنی در این زمینه، اهمیت و جایگاه مطالعه و بهبود مصرف انرژی را در این صنعت نمایان می‌سازد. با توجه به نیاز همزمان این صنعت به برق و بخار، استفاده از سیستم تولید همزمان با محرک توربین بخار مناسب به نظر

می‌رسد. چرا که با استفاده از یک منبع مصرف سوخت، برق و بخار مورد نیاز در محل مصرف تولید می‌گردد. بدین ترتیب میزان مصرف سوخت کاهش یافته و راندمان تولید افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با حذف مصرف کننده‌های سوخت اولیه، تولید آلاینده‌ها نیز کاهش می‌یابد.

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که سیستم تولید همزمان با توربین بخار در کارخانه قند شاهرود به صورت مطالعه موردی بررسی نشده است و همچنین تاکنون استفاده از سیکل ترکیبی دو نوع مولد توربین گاز و توربین بخار در این صنعت یا به طور مجزا در سیستم‌های تولید همزمان مورد بررسی قرار نگرفته است.

علاوه بر این بررسی انرژی، انرژی، هزینه‌های عملکردی و احداث و راندمان بر اساس تمامی متغیرهای طراحی به‌طور همزمان از مهم‌ترین موضوعات در راستای احداث نیروگاه‌ها و تأمین برق می‌باشد. اکثر محققان به بررسی چند معیار بر روی نیروگاه‌ها، جهت بررسی و بهینه‌سازی پرداخته‌اند و همواره تحقیق در راستای ظرفیت احداث یک نیروگاه بر اساس حداکثر راندمان انرژی و انرژی در اولویت است که این خود نشان‌دهنده اهمیت این موضوع می‌باشد. از این رو در این پژوهش نیز به طراحی و شبیه‌سازی نیروگاه‌های گازی، بخار و سیکل ترکیبی و محاسبه راندمان انرژی و انرژی بر اساس ظرفیت، فشار کاری، دمای ورودی به توربین، فشار کندانسور و فشار بویلر در نرم‌افزارهای EES¹ و Matlab² پرداخته شده است.

همچنین در این پژوهش:

◀ سیستم تولید همزمان دوگانه با توربین بخار، موتور گازسوز و توربین گاز به عنوان

محرك اولیه شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است.

¹ Engineering Equation Solver

² MATrix LABoratory

◀ ترکیب هیبریدی توربین‌گاز، توربین‌بخار و موتو رگازسوز به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته است.

◀ مباحث انرژی، انرژی و اقتصادی برای هر سه حالت مجزا و هیبریدی مورد بررسی قرار گرفته است.

◀ همچنین در این بررسی تمامی عوامل تأثیرگذار اعم از درجه حرارت محیط، ارتفاع از سطح دریا، افت فشار و ... در نظر گرفته شده است که تاکنون به طور دقیق به این موضوع پرداخته نشده است.

◀ استفاده‌ی همزمان از دو نوع مولد به عنوان محرک اولیه در یک سیستم تولید همزمان دارای مزایای قابل توجهی است که با تقسیم تقاضای مجموعه بر حسب ظرفیت محرک اولیه، می‌توان بهره‌وری سوخت و راندمان سیستم تولید همزمان را بهبود بخشید.

◀ در این پژوهش رفتار عملکردی هر سه مولد به صورت کارکرد در بار جزئی در نظر گرفته شده و تغییرات به صورت نموداری نشان داده شده است. استفاده‌ی همزمان از دو نوع مولد به عنوان محرک اولیه، دارای مزایای قابل توجهی است که می‌تواند در بارهای جزئی پایین تنها یک محرک اولیه به طور کامل به عنوان مولد ایفای نقش نماید. از این رو با در نظر گرفتن این مورد در این پژوهش، بهبود عملکرد سیستم تولید همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. تمامی این موارد نکات مهمی است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است در صورتی که در پژوهش‌های پیشین به این موضوع پرداخته نشده است.

فصل سوم:

مدل سازی انرژی، آگزرژی و اقتصادی

یکی از مهم‌ترین عوامل در طراحی و ساخت یک سیستم برای جایگزینی آن با سیستم‌های سنتی، بررسی و تحلیل انرژی، امکان‌پذیری و مقایسه با سیستم‌های سنتی است. چنانچه در گام اول، یک سیستم

نو ظهور از نظر فنی قابلیت جایگزینی با سیستم‌های سنتی را دارا باشد، در گام بعدی از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ بنابراین در گام اول می‌بایست تحلیل ترمودینامیکی به طور کامل انجام گیرد. در این فصل ابتدا به تشریح عملکرد کارخانه قند پرداخته خواهد شد. سپس کارخانه قند شاهرود به عنوان نمونه مطالعه‌ی موردی معرفی خواهد شد. سپس روابط حاکم بر سیستم تولید همزمان بر پایه‌ی توربین بخار، توربین گاز و موتور گازسوز تشریح و با سیستم کنونی و سیستم مجزا از حیث انرژی، انرژی و اقتصادی مقایسه خواهد شد. در ادامه پارامترهای کاهش مصرف سوخت، کاهش هزینه‌های عملکردی و دوره‌ی بازگشت سرمایه و نرخ بازگشت سرمایه بر اساس ارزش پولی و زمانی معرفی و محاسبه خواهد شد. اجزای مورد بررسی در سیستم مورد نظر شامل محرک اولیه‌ی توربین بخار، توربین گاز، موتور گازسوز، بازیاب، بویلر بخار، بویلر پشتیبان، ژنراتور و کندانسور و سایر اجزای کارخانه‌ی قند خواهد بود. همچنین در این فصل تمام فرضیات و روابط کاربردی نیز به ترتیب آورده شده است.

۳-۲ فرایند تولید شکر از چغندر قند

۳-۲-۱ کاشت داشت و برداشت چغندر

چغندر قندهای رسیده و سالم آماده برداشت شده و معمولاً بعد از حمل به کارخانه سر و دم آن‌ها قطع شده و تا حد امکان عاری از مواد خارجی می‌گردد.

۳-۲-۲ تحویل دادن چغندر قند به کارخانه

پس از تخلیه، چغندر تا زمان مصرف در سیلو نگهداری می‌شوند. باید از نگهداری طولانی مدت چغندر قند در سیلو اجتناب کرد؛ زیرا چغندر در سیلو با پدیده افت وزنی و ضایعات قندی در اثر تنفس و فساد میکروبی مواجه می‌گردد.

۳-۲-۳ انتقال چغندر به محل فرآیند

غالباً برای انتقال چغندر از سیلو به محل فرآیند از جریان آب و نوارهای انتقال استفاده می‌شود در ضمن انتقال اعمالی مانند سنگ‌گیری و علف‌گیری نیز انجام می‌شود. شکل (۳-۱) و (۳-۲) خط انتقال آب و چغندر از سیلو به مرحله‌ی تولید را در کارخانه قند و شکر شاهرود نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱): کانال انتقال آب برای انتقال چغندر به مراحل تولید



شکل (۳-۲): نوار انتقال چغندر از سیلو به کانال انتقال چغندر

۳-۲-۴ شستشوی چغندر

شستشوی چغندر با استفاده از آب و دستگاه‌های شستشو به شکل نیم استوانه انجام می‌شود که در آن‌ها با حرکت بازوهای گردان و ساییدن چغندرها بهم عمل شستشو صورت می‌گیرد. شکل (۳-۳) نمای خارجی از دستگاه شستشو را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳): نمای خارجی دستگاه شستشوی چغندر قند

۳-۲-۵ تهیه خلال چغندر

برای استخراج قند از چغندر آن را به صورت خلال در آورده که این کار در دستگاه آسیاب خلال صورت می‌گیرد. از خلال‌های تولیدی نمونه‌برداری شده و درصد قند آن‌ها طی آزمایشی که اصطلاحاً

دیژسیون خوانده می‌شود اندازه‌گیری می‌گردد. خلال‌ها قبل از ورود به مرحله بعد با ترازوهای مخصوصی توزین می‌شود. لذا با داشتن وزن و درصد قند آن‌ها می‌توان مقدار قند وارد شده به فرآیند را تعیین کرد. شکل (۳-۴) نمای بیرونی دستگاه تولید خلال را در کارخانه مذکور نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴): نمای خارجی دستگاه تولید خلال چغندر

۳-۲-۶ استخراج قند از خلال

به این مرحله شربت‌گیری-عصاره‌گیری و یا دیفیوزیون نیز گفته می‌شود. عمل استخراج قند از خلال در دستگاه دیفیوزیون یا دیفیوزور و با استفاده از خاصیت انتشار و فشار اسمزی که مربوط به اختلاف غلظت در داخل و خارج از سلول‌های خلال است صورت می‌گیرد. برای خروج بهتر مواد قندی از خلال از حرارت و بهم زدن نیز کمک گرفته می‌شود. معمولاً در دیفیوزور آب گرم و خلال در دو جهت مخالف هم حرکت کرده و مواد قندی به تدریج از خلال استخراج می‌شود و در نهایت از یک طرف دستگاه شربت خام و از طرف دیگر تفاله خارج می‌شود تفاله در حقیقت خلالی است که قند موجود در آن تا حد امکان گرفته شده است. البته معمولاً مقدار کمی قند در آن باقی می‌ماند که جزو ضایعات قندی کارخانه محسوب می‌شود. تفاله‌ی تر خروجی از دیفیوزر تحت فشار قرار گرفته و مقدار زیادی از آب آن که محتوی مواد قندی است جدا شده و مجدداً به دیفیوزور بازگشت داده می‌شود. شکل‌های (۳-۵) و (۳-۶) دو نما از دستگاه دیفیوزیون موجود در کارخانه را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵): دستگاه دیفیوزن موجود در کارخانه قند و شکر شاهرود



شکل (۳-۶): بخش محرک دستگاه دیفیوزن موجود در کارخانه قند و شکر شاهرود

۳-۲-۷ تصفیه شربت خام

شربت خام خروجی از دیفیوزر رنگ خاکستری متمایل به سبز داشته و ناخالصی زیادی دارد لذا باید آن را تصفیه کرد در متداولترین روش تصفیه شربت خام از شیر آهک و گاز کربنیک برای جداسازی ناخالصی‌ها استفاده می‌شود. این عمل در کوره آهک انجام شده و سنگ آهک را با استفاده از حرارت به

آهک و گاز کربنیک تبدیل می‌کنند. با حل کردن آهک در آب شیر آهک به دست می‌آید که همراه با گاز کربنیک در تصفیه شربت خام به کار می‌رود. شکل (۷-۳) کوره آهک را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۳): کوره آهک موجود در کارخانه قند و شکر شاهرود

زدن شیر آهک به شربت خام معمولاً در دو مرحله انجام می‌شود ابتدا آهک زدن مقدماتی یا پرشولاژ که حدود ۰/۱ آهک مصرفی به شربت زده می‌شود و بعد مرحله آهک زدن اصلی یا شولاژ که بقیه آهک لازم به صورت شیر آهک به شربت خام زده می‌شود آهک با ناخالصی‌های موجود در شربت خام واکنش داده و ایجاد ترکیبات کلسیم می‌کند اغلب این ترکیبات آماده رسوب کردن و جداسازی از شربت هستند. به این فرایند کربناسیون یا اشباع یا ساتراسیون یا کربناتاسیون نیز گفته می‌شود در این قسمت به شربت آهک خورده اغلب طی دو مرحله یعنی کربناسیون یک و کربناسیون دو گاز کربنیک می‌زنند در نتیجه در اثر ترکیب شدن آهک موجود در شربت و گاز کربنیک ایجاد کربنات کلسیم می‌شود کربنات کلسیم ضمن رسوب کردن مقدار زیادی از ناخالصی‌های شربت را رسوب داده و جداسازی می‌کند.

پس از زدن گاز کربنیک به شربت در مرحله کربناسیون یک مقداری از ناخالصی‌های شربت به همراه کربنات کلسیم شروع به رسوب کردن می‌کند این شربت به دستگاه ته‌نشین‌سازی که دکانتور یا کلاریفایر

نیز خوانده می‌شود انتقال یافته و مواد رسوبی آن جدا می‌شوند. به این رسوبات اصطلاحاً گل گفته می‌شود. شربت به‌دست آمده از بالای دکانتور به مرحله بعدی (کربناسیون ۲) می‌رود و گل ته نشین شده که مقداری قند دارد به دستگاه صافی تحت خلأ می‌رود و مقداری از مواد قندی جداسازی شده و گل باقی مانده بر روی صافی خلأ، گرچه هنوز مقدار اندکی قند دارد اما این گل را به خارج از کارخانه حمل کرده و قند باقی مانده در آن به عنوان ضایعات قندی گل به حساب می‌آورند. شربتی که به کربناسیون دوم رفته پس از زدن گاز کربنیک به آن مجدداً وارد صافی‌های دیگری شده و در نهایت شربت رقیق تصفیه شده به‌دست می‌آید مراحل تصفیه بیان شده را تصفیه کلاسیک نیز می‌گویند که با روش‌های معمول در بعضی کارخانه‌ها ممکن است تفاوت‌هایی داشته باشد. برای مثال در بعضی دیگر از کارخانه‌ها عمل آهک‌زدن و گاز زدن به شربت به‌صورت همزمان و در یکجا انجام می‌شود که به آن فرایند دفکو کربناسیون می‌گویند و یا در برخی از سیستم‌های تصفیه ممکن است قبل از کربناسیون دوم مجدداً مقدار اندکی شیر آهک به شربت زده شود که به آن آهک‌زنی مجدد گفته می‌شود. شکل (۸-۳) دستگاه فیلتر ممبران یا همان دستگاه تصفیه گل شربت را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۳): دستگاه تصفیه گل شربت

در برخی کارخانه‌ها برای کاهش رنگ شربت به آن گاز یا ترکیبات دیگر گوگرددار زده می‌شود و شربت رنگ روشن‌تری پیدا می‌کند. ممکن است از روش‌های دیگر رنگ‌بری مانند کاربرد زغال فعال نیز استفاده شود. پس از تصفیه شربت خام درجه خلوص شربت افزایش پیدا می‌کند درجه خلوص با واژه‌های دیگری مانند درجه تمییزی نیز مطرح می‌شود و منظور از آن معمولاً نسبت درصد قند به درصد مواد جامد محلول یا بریکس در شربت می‌باشد. برای مثال شربت خام از حدود ۸۵ تا ۸۸ درصد پس از تصفیه به حدود ۹۰ درصد یا بیشتر در شربت رقیق می‌رسد.

شربت رقیق غلظت کمی دارد و درصد مواد جامد آن برای مثال حدود ۱۲ تا ۱۳ درصد است؛ لذا باید آن را غلیظ کرد. این کار در دستگاه‌های تغلیظ کننده و اواپراتور با استفاده از بخار انجام می‌شود به منظور کاهش هیدرولیز قند و تغییر رنگ شربت تحت تأثیر حرارت بالا و همچنین برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی عمل تغلیظ شربت در سیستم‌های تغلیظ چند مرحله‌ای و تحت خلأ در دمای پایین‌تری انجام می‌شود در نهایت بریکس شربت غلیظ برای مثال تا حدود ۶۰ درصد می‌رسد. شکل (۳-۹)

دستگاه‌های تغلیظ شربت را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۹): دستگاه تغلیظ شربت شکر

در مرحله کریستالیزاسیون شربت به صورت کریستال درآمده و راندمان کریستال را بالا می‌برد.
کریستالیزاسیون به دو روش صورت می‌گیرد:

۱- روش حرارت دادن تبخیر کردن و رساندن محلول به حالت اشباع و فوق اشباع

۲- با استفاده از سردکردن از هر دو روش در صنعت قند.

عمل کریستالیزاسیون در دستگاهی به نام آپارات انجام می‌شود. در کریستالیزاسیون باید شربت گرم و تغلیظ شود در زیر لوله‌ها مبدل‌های حرارتی وجود دارند و یک لوله بزرگ‌تر در وسط آن قرار دارد داخل لوله‌ها شربت حرکت نموده و از پشت لوله بخار می‌گذرد و شربت شروع به جوشش می‌نماید. شکل (۳-۱۰) آپارات‌های موجود در کارخانه قند و شکر شاهرود را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۰): آپارات‌های موجود در کارخانه قند و شکر شاهرود

۳-۲-۸ سانتریفیوژ:

سانتریفیوژ یک سبد توری شکل است که محصول اولیه داخل آن ریخته شده و از این توری‌ها به علت سرعت زیاد، آب خارج شده و شکر روی توری باقی می‌ماند و بدان پساب ضعیف گویند. شکل (۳-۱۱) نمای خارجی دستگاه سانتریفیوژ را نشان می‌دهد. کریستال روی توری با آب شسته می‌شوند تا

رنگی که روی سطح کریستال‌ها است از بین برود و بعد از شستشو با آب از نازل بخار استفاده کرده تا اگر آبی بر روی سطح کریستال‌ها مانده خارج شود و به آبی که بر روی کریستال‌ها ریخته می‌شود و از توری خارج می‌شود، پساب قوی می‌گویند. زیرا مقداری از کریستال را در خود حل می‌نماید و درصد خلوص بالایی دارد. بعد از بخار زدن دستگاه را خاموش کرده و از دریچه زیر سانتریفوژ شکرها خارج می‌شوند. شکری که از آپارات حاصل شده است، شکر درجه ۱ است و این شکر را وارد خشک‌کن کرده و رطوبت آن را کم کرده و بعد دسته‌بندی و به انبار فرستاده می‌شود و اگر خواسته شود از این شکر قند تهیه گردد مجدداً وارد حل‌کن شکر شده و به آن آب اضافه می‌گردد و از آن محلولی تهیه می‌شود که این محلول وارد مرحله‌ی قندسازی می‌گردد.



شکل (۳-۱۱): دستگاه سانتریفوژ

۳-۲-۹ مرحله قندسازی:

برای تولید قند از شکر درجه ۱ استفاده می‌گردد. ابتدا شکر را با آب در حل‌کن مخلوط کرده و شربتی تولید می‌شود. شربت باید رنگش شفاف‌تر و سفیدتر باشد به همین دلیل برای گرفتن رنگ از شربت، از فرایند رنگ‌بری استفاده می‌شود. رنگ‌بری با استفاده از دو روش زغال اکتیو و استفاده از رنگ‌بر انجام می‌شود.

بعد از آن که محلول از این دو ماده عبور داده شد، در مرحله بعد باید زغال‌ها از شربت جدا گردد و شربت از صافی‌های صفحه‌ای شکل تحت فشار عبور داده شده و در اثر دو بار صاف کردن شربت شفاف‌ی بدست می‌آید، حال باید آپارات پخت قند انجام گیرد. آپارات قند مانند آپارات پخت شکر است. با این تفاوت که مدت زمان پخت کمتر است.

۳-۳ مطالعه موردی

- شرکت شکر شاهرود (سهامی عام) در تاریخ ۱۳۳۷/۷/۲۳ تحت شماره ۶۳۰۶ در اداره ثبت شرکت‌ها و مالکیت صنعتی تهران به ثبت رسیده است.
- فعالیت اصلی شرکت طبق ماده ۲ اساسنامه «تصفیه شکرخام، تهیه قند و شکر از چغندر و سایر تولیدات مربوط و هر نوع فعالیت تولیدی و صنعتی و کشاورزی مربوط به صنعت قند و شکر و مشارکت در سایر شرکت‌ها» می‌باشد. شرکت در تاریخ ۱۳۷۵/۱۲/۲۰ در بورس اوراق بهادار تهران پذیرفته و نام آن از تاریخ ۱۳۷۵/۱۲/۲۸ در تابلوی بورس درج شده است. مرکز اصلی شرکت در تهران و کارخانه آن در شهرستان شاهرود می‌باشد. ظرفیت‌های تولیدی شرکت براساس پروانه بهره‌برداری مورخ ۱۳۵۴/۱۲/۲۲ و اصلاحیه مورخ ۱۳۷۸/۱۲/۴ مطابق جدول (۱-۳) می‌باشد.

جدول (۱-۳): ظرفیت تولیدی کارخانه قند و شکر شاهرود

شرح	روزانه (تن)	تعداد روزهای کاری	ظرفیت مصرف تولید
مصرف چغندر قند	۱۱۰۰	۱۰۰	۱۱۰۰۰۰
تبدیل شکر خام به شکر سفید و قند کله در سه شیفت	۴۷۰	-	-

سرمایه و ترکیب سهامداران

سرمایه شرکت در بدو تأسیس مبلغ ۳۰۰ میلیون ریال (شامل ۱۰۰۰۰ سهم، به ارزش اسمی هر سهم ۳۰۰۰۰ ریال) بوده که طی چند مرحله به شرح زیر به مبلغ ۲۸۰۰۰ میلیون ریال (شامل تعداد ۲۸،۰۰۰،۰۰۰ سهم، به ارزش اسمی هر سهم ۱۰۰۰ ریال) افزایش یافته است.

همانطور که در قسمت توضیح عملکردی کارخانه‌ی تولید قند و شکر تشریح شد، کلیه‌ی مراحل تولید قند و شکر نیازمند صرف انرژی الکتریکی، حرارتی و بخار مصرفی جهت انجام این فرایندها می‌باشد. راه‌اندازی سیستم‌های تولید همزمان در کارخانجات قند و شکر باعث کاهش مصرف انرژی و ذخیره‌ی سرمایه خواهد گردید. از این رو در بخش پیش رو آنالیز انرژی سیستم‌های تولید همزمان ارائه شده است.

۳-۴ آنالیز انرژی

آنالیز انرژی سیستم‌های ترمودینامیکی از جمله مباحث نظری‌اند که با استفاده از قوانین ترمودینامیک، کارکرد دقیق و بهینه‌ی یک سیستم را با تحلیل عوامل عملکردی، بیان می‌کند [۲۴]. از مستلزمات طراحی هر سیستم تولید همزمان، پیاده‌سازی قوانین انرژی است. به دلیل متغیر بودن بارهای الکتریکی و گرمایشی مورد نیاز مصرف‌کنندگان با زمان، تجهیزات سیستم تولید همزمان باید خروجی متفاوتی نسبت به زمان داشته باشند. به همین دلیل نیاز است تا تجهیزات در بعضی ساعات در بار کمتری از بار نامی خود و اصطلاحاً در بار جزئی^۱ کار کنند. با تغییر نقطه‌ی کارکرد تجهیزات، شاخص‌های فنی تجهیزات همچون بازده، مصرف سوخت و حرارت دریافتی تغییر می‌کند [۲۲]. با توجه به استفاده از سیستم تولید همزمان، می‌بایست آنالیز انرژی برای سیستم مورد نظر انجام گردد. هدف از این محاسبات، مشخص نمودن بهترین نوع ترکیب با بیشترین توان خروجی، حداکثر

^۱ Part Load

حرارت بازیافتی، راندمان کلی و کمترین سوخت مصرفی در سیستم پیشنهادی است؛ بدین منظور تمامی این شاخص‌ها متناسب با پارامترهای متغیر در نرم‌افزار EES¹ مدل‌سازی شده است.

۳-۴-۱ فرضیات

- ۱- سیستم در حالت پایا در حال کار است.
- ۲- هوای موجود در واکنش احتراق دارای ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن است.
- ۳- ضرایب C_p و C_v به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده است.
- ۴- دمای محیط به صورت متغیر و متناسب با ۱۲ ماه سال در نظر گرفته شده است.
- ۵- فشار محیط در ارتفاع دریا برابر ۱ atm و در سایر ارتفاعات متناسب با تغییرات ارتفاع متغیر در نظر گرفته شده است.
- ۶- ارزش حرارتی سوخت متناسب با نوع سوخت در نظر گرفته شده است.

۳-۴-۲- آنالیز انرژی سیستم متمرکز (سیستم تولید جداگانه)

در سیستم تولید جداگانه، انرژی الکتریکی مورد نیاز مجموعه E_{Grid}^{SP} از طریق برق شبکه تأمین می‌گردد و از رابطه (۱-۳) قابل محاسبه است. بار حرارتی مجموعه، Q_H از طریق بویلر گازسوز تأمین شده و به وسیله‌ی کویل حرارتی به مصرف‌کنندگان انتقال می‌یابد [۷۳].

$$E_{Grid}^{SP} = E_{dem} \quad (۱-۳)$$

در رابطه‌ی (۱-۳)، E_{dem} انرژی الکتریکی مورد نیاز برای روشنایی و سایر تجهیزات الکتریکی است همچنین حرارت مورد نیاز برای کویل حرارتی، Q_H ، به منظور تأمین بار حرارتی مجموعه از رابطه‌ی (۳-۲) قابل محاسبه است [۱۲].

$$Q_{hc} = \frac{Q_H}{\eta_{hc}} \quad (۲-۳)$$

¹ Engineering Equation Solver

در رابطه‌ی (۳-۲)، η_{hc} راندمان کویل حرارتی است؛ بنابراین سوخت مصرفی در بویلر، F_{Boiler}^{SP} که

حرارت مورد نیاز کویل حرارتی را تأمین می‌کند از رابطه‌ی (۳-۳) به دست می‌آید [۲۳].

$$F_{Boiler}^{SP} = \frac{Q_{hc}}{\eta_{Boiler}} \quad (۳-۳)$$

همچنین در رابطه‌ی (۳-۳)، η_{Boiler} راندمان بویلر است.

۳-۴-۳ آنالیز انرژی سیستم تولید همزمان

سیستم تولید همزمان بسیار تحت تأثیر بار الکتریکی و بار گرمایشی مورد نیاز مجموعه است. از این‌رو، طراحان سیستم‌های تولید همزمان از استراتژی‌های عملکرد مختلفی به منظور تأمین تقاضای انرژی در مجموعه استفاده می‌کنند. دو استراتژی عملکرد اصلی سیستم‌های تولید همزمان عبارت‌اند از استراتژی تأمین بار الکتریکی و استراتژی تأمین بار حرارتی [۷۴].

در سیستم تولید همزمان تحت عملکرد استراتژی تأمین بار الکتریکی، تقاضای انرژی الکتریکی مجموعه به عنوان مبنای طراحی قرار می‌گیرد. بدین مفهوم که انرژی الکتریکی تولیدی توسط محرک‌های اولیه، E_{pgu} با بار الکتریکی مجموعه، E_{req} طبق رابطه‌ی (۳-۴) تطبیق داده می‌شود. لذا ممکن است انرژی حرارتی باقی‌مانده از محرک اولیه، Q_{rec} برابر با انرژی حرارتی مورد نیاز مجموعه نباشد. همچنین امکان فروش برق به شبکه در این استراتژی وجود ندارد. برای سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما تحت استراتژی تأمین بار الکتریکی، روابط (۳-۴) تا (۳-۱۰) حاکم است [۲۳].

$$E_{req} = E_{pgu} \quad (۳-۴)$$

انرژی حرارتی مورد نیاز مجموعه، از رابطه‌ی (۳-۵) به دست می‌آید [۱۲]:

$$Q_{req} = Q_H + Q_{HW} \quad (۳-۵)$$

که در آن Q_H حرارت مورد نیاز جهت گرمایش مجموعه و Q_{HW} حرارت مورد نیاز جهت تأمین آبگرم

مصرفی است که از رابطه‌ی (۳-۶) به دست می‌آید [۲۳، ۷۵]:

$$Q_{HW} = \rho_w C_w \dot{V} (T_2 - T_1) \quad (6-3)$$

در رابطه‌ی (۶-۳)، \dot{V} دبی آبگرم مورد استفاده، T_1 دمای آب ورودی و T_2 دمای آبگرم مصرفی، ρ_w چگالی و C_w ظرفیت گرمایی آب است.

سوخت مصرفی در محرک اولیه، F_{pgu} نیز از رابطه‌ی (۷-۳) قابل محاسبه است [۷۶]:

$$F_{pgu} = \frac{E_{pgu}}{\eta_{pgu}} \quad (7-3)$$

در رابطه‌ی (۷-۳)، η_{pgu} راندمان الکتریکی محرک اولیه است. چنانچه انرژی حرارتی بازیاب شده از محرک‌های اولیه کمتر از انرژی حرارتی مورد نیاز باشد، کمبود انرژی حرارتی مورد نیاز، باید از طریق بویلر کمکی تأمین شود که از رابطه‌ی (۸-۳) قابل محاسبه است [۲۳]:

$$Q_{Boiler} = Q_{req} - Q_{rec} \quad (8-3)$$

سوخت مصرفی بویلر کمکی از رابطه‌ی (۹-۳) به دست می‌آید و همچنین رابطه‌ی (۱۰-۳) کل سوخت مصرفی سیستم تولید همزمان را نشان می‌دهد [۱۲].

$$F_{Boiler}^{CCHP} = \frac{Q_{Boiler}}{\eta_{Boiler}} \quad (9-3)$$

$$F_{total} = F_{Boiler}^{CCHP} + F_{pgu} \quad (10-3)$$

در سیستم تولید همزمان تحت استراتژی تأمین بار حرارتی، حرارتی که باید توسط سیستم تولید و در صورت نیاز توسط بویلر کمکی تأمین گردد مشابه رابطه‌ی (۵-۳) است و مقدار حرارتی که باید از محرک اولیه بازیاب گردد، Q_{req} ، طبق رابطه‌ی (۱۱-۳) با بار حرارتی مورد نیاز تطبیق داده می‌شود [۲۳]:

$$Q_{rec} = Q_{req} \quad (11-3)$$

بنابراین سوخت مصرفی در محرک اولیه، F_{pgu} ، از رابطه‌ی (۱۲-۳) قابل محاسبه است [۷۷]:

$$F_{pgu} = \frac{Q_{req}}{\eta_{dem}(1 - \eta_{pgu})} \quad (12-3)$$

در رابطه‌ی (۱۲-۳)، η_{dem} راندمان واحد بازیاب حرارت^۱ است؛ بنابراین انرژی الکتریکی تأمین شده توسط موتور گازسوز، E_{pgu} ، از رابطه‌ی (۱۵-۳) به دست می‌آید [۲۳]:

$$E_{pgu} = F_{pgu}\eta_{pgu} \quad (13-3)$$

با توجه به اینکه سیستم بر اساس تأمین بار حرارتی عمل می‌کند، مقدار حرارت بازیابی از محرک اولیه نمی‌تواند از مقدار حداکثر حرارت مورد نیاز بیشتر باشد؛ بنابراین حرارت اضافی مورد نیاز، Q_{Boiler} می‌بایست توسط بویلر کمکی تأمین گردد که مقدار آن از رابطه‌ی (۱۴-۳) محاسبه می‌شود [۷۸].

$$\begin{aligned} Q_{Boiler} &= Q_{dem} - Q_{rec} & Q_{dem} > Q_{rec} \\ Q_{Boiler} &= 0 & Q_{dem} = Q_{rec} \end{aligned} \quad (14-3)$$

سوخت مصرفی بویلر کمکی، F_{Boiler}^{CCHP} ، نیز از رابطه‌ی (۱۵-۳) قابل محاسبه است و کل سوخت مصرفی سیستم تولید همزمان، F_{total} ، از رابطه‌ی (۱۶-۳) به دست می‌آید [۲۳]:

$$F_{Boiler}^{CCHP} = \frac{Q_{Boiler}}{\eta_{Boiler}} \quad (15-3)$$

$$F_{total} = F_{Boiler}^{CCHP} + F_{pgu} \quad (16-3)$$

همچنین در استراتژی تأمین بار حرارتی، انرژی الکتریکی تأمین شده توسط محرک اولیه ممکن است برای تأمین تقاضای انرژی الکتریکی مجموعه مبنا کافی نباشد و یا بیش از بار الکتریکی مجموعه باشد، انرژی الکتریکی اضافی مورد نیاز، E_{grid}^{cchp} ، باید از طریق برق شبکه تأمین شود. همچنین می‌توان انرژی الکتریکی اضافی تولید شده، E_{exp} را در صورت امکان به شبکه فروخت. روابط (۱۷-۳) و (۱۸-۳) تطبیق بار الکتریکی را تحت استراتژی تأمین بار حرارتی نشان می‌دهد [۷۸].

^۱ Heat recovery unit

$$E_{grid}^{cchp} = E_{dem} - E_{pgu} \quad E_{dem} > E_{pgu} \quad (17-3)$$

$$E_{grid}^{cchp} = 0 \quad E_{dem} \leq E_{pgu}$$

$$E_{exp} = E_{pgu} - E_{dem} \quad E_{pgu} > E_{dem} \quad (18-3)$$

$$E_{exp} = 0 \quad E_{pgu} \leq E_{dem}$$

در هنگام محاسبه‌ی مقادیر سوخت مصرفی توسط بویلر کمکی و همچنین محرک اولیه، راندمان محرک اولیه و بویلر نقش بسزایی دارد که این مقدار به نوع کارکرد و مقدار بار جزئی هر تجهیز بستگی دارد. با کاهش ظرفیت کارکرد تجهیزات نسبت به بار نامی راندمان تجهیزات کاهش می‌یابد. کارکرد تجهیزات مانند بویلر تابعی از مقدار بار جزئی است که از رابطه‌ی (۱۹-۳) قابل محاسبه است [۷۸, ۷۹].

بویلر:

$$\frac{\eta_{Boiler,PL}}{\eta_{Boiler,nom}} = 0.0951 + 1.525PL - 0.6249PL^2 \quad (19-3)$$

در رابطه‌ی (۱۹-۳)، $\eta_{Boiler,nom}$ راندمان نامی بویلر است. همچنین PL بار جزئی بویلر است [۷۸, ۷۹].

با محاسبه‌ی بارهای الکتریکی و گرمایشی و انتخاب نوع استراتژی تأمین بار، می‌بایست محرک اولیه متناسب با ظرفیت آن انتخاب شود.

با توجه به نوع کاربری کارخانه قند و شکر و نیاز به بخار با دما و فشارهای مختلف و همچنین نیاز همزمان به الکتریسیته، استفاده از توربین بخار به عنوان محرک اولیه‌ی سیستم تولید همزمان مناسب به نظر می‌رسد. از این رو در این پژوهش توربین بخار به عنوان محرک اولیه در نظر گرفته شده است و محاسبات بر این مبنا در ادامه ارائه می‌گردد. همچنین با توجه به اینکه محرک‌های اولیه دیگر نیز قابلیت جایگزینی با توربین بخار را دارا می‌باشند معرفی و روابط آنها ارائه شده است. در نهایت با معرفی و مقایسه‌ی سناریوهای معرفی شده بهترین ترکیب معرفی می‌گردد.

جدول (۳-۲) مشخصات محرک های اولیه را نشان می دهد [۸۰].

جدول (۳-۲): مشخصات فنی محرک های اولیه [۸۰]

موتور گازسوز	توربین گاز	توربین بخار	
۳۳۲۶ kW	۳۳۰۴ kW	۳۰۰۰ kW	ظرفیت
گاز طبیعی	گاز طبیعی	گاز طبیعی	سوخت مصرفی
۸۲۴۲ kW	۱۳۸۰۴ kW	۶۱۰۴۶ kW	مصرف سوخت در بار نامی
۱۱	-	-	نسبت تراکم
-	۱۴	۴	نسبت فشار
-	-	۱۲۰ bar	فشار بویلر
-	-	۲ bar	فشار کندانسور
۱/۰۶	۰/۵۷	۰/۰۶۶	نسبت توان به حرارت
۰/۴	۰/۴۲	۰/۷۴۸	ضریب حرارت به مصرف سوخت

۳-۴-۴ موتور گازسوز

مشخصات فنی موتور گازسوز طبق روابط (۳-۲۴) تا (۳-۲۹) قابل محاسبه است. رابطه‌ی (۳-۲۴) بیانگر راندمان موتور در حالت کارکرد در بار نامی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، راندمان موتور در حالت نامی با توان تولیدی، دما و ارتفاع محیط تغییر می‌نماید [۱۲].

$$\eta_{GE,nom}(E_{nom}, T, P) = \frac{E_{nom}}{2.65 \times E_{nom} + 21.44} \times \left(1 - 0.01 \frac{T - T_{design}}{5.5}\right) \times \left(1 - 0.03 \frac{Z - Z_{design}}{303}\right) \quad (3-24)$$

در رابطه‌ی (۳-۲۴)، E_{nom} نشان‌دهنده‌ی ظرفیت نامی موتور، T ، دما و Z ارتفاع محیط است. در رابطه‌ی (۳-۲۴) اختلاف دما و ارتفاع از مقدار طراحی، به عنوان ضریب کمتر از یک بوده و باعث کاهش راندمان نامی می‌گردد [۱۲].

رابطه‌ی (۲۵-۳) نشان‌دهنده‌ی راندمان موتور در حالت کارکرد در بار جزئی است [۲۲، ۸۱].

$$\frac{\eta_{GE,PL}}{\eta_{GE,nom}} = -0.0001591PL^2 + 0.024PL + 0.1904 \quad (25-3)$$

همچنین رابطه‌ی (۲۶-۳) دبی سوخت مصرفی برحسب ظرفیت کاری در بار جزئی را نشان می‌دهد

[۷۸].

$$\frac{m_{fuel,PL,GE}}{m_{fuel,nom,GE}} = 0.2408 \exp(0.01403PL) + 0.03553 \exp(-0.02494PL) \quad (26-3)$$

در رابطه‌ی (۲۶-۳)، $m_{f,nom,GE}$ نشان‌دهنده‌ی سوخت مصرفی موتور در بار نامی است. چنانچه

دمای خروجی از محفظه‌ی احتراق، نسبت تراکم، ارتفاع از سطح دریا و دمای محیط تغییر کند، این

پارامتر نیز مقادیر دیگری را به خود اختصاص خواهد داد؛ بنابراین می‌توان میزان سوخت مصرفی در

موتور اولیه را از رابطه‌ی (۲۷-۳) محاسبه نمود [۸۲].

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{m}_{gas} \times C_p \times (T_{out} - T_{in})}{LHV} \quad (27-3)$$

در رابطه‌ی (۲۷-۳)، C_p به صورت تابعی از دما بوده و مطابق روابط (۲۸-۳) و (۲۹-۳) برای گاز و

هوا قابل محاسبه است [۴۰، ۸۳]:

$$C_{p,g}(T) = 0.9874 + 0.0000544T + \frac{1.48}{10^7} T^2 - \frac{6.57}{10^{11}} T^3 \quad (28-3)$$

$$C_{p,a}(T) = 1.04841 - 0.000383719T + \frac{9.45378}{10^7} T^2 - \frac{5.49031}{10^{10}} T^3 + \frac{7.92981}{10^{14}} T^4 \quad (29-3)$$

دمای ورودی به محفظه‌ی احتراق، در رابطه‌ی (۲۷-۳)، نیز متناسب با نسبت تراکم موتور گازسوز

مطابق رابطه‌ی (۳۰-۳) به دست می‌آید [۸۲].

$$T_{in,Engine} = T_{air} \times r_c^{(k-1)} \quad (30-3)$$

که در رابطه‌ی (۳۰-۳)، r_c نسبت تراکم موتور گازسوز است.

حرارت قابل دریافت از موتور گازسوز شامل حرارت ناشی از ژاکت خنک‌کننده، گازهای داغ خروجی و روغن روانکار است. حرارت قابل دریافت از موتور گازسوز، طبق روابط (۳۱-۳) تا (۳۳-۳) برحسب بار جزئی قابل تخمین است [۱۲، ۲۴].

$$\frac{Q_{jw,PL,GE}}{m_{fuel,PL,GE}LHV_{gas}} = 17.49 \exp(-0.07512PL) + 39.36 \exp(-0.002556PL) \quad (31-3)$$

$$\frac{Q_{ex,PL,GE}}{m_{fuel,PL,GE}LHV_{gas}} = 8.566 \exp(-0.02619PL) + 18.91 \exp(0.001194PL) \quad (32-3)$$

$$\frac{H_{oil,PL,GE}}{m_{fuel,PL,GE}LHV_{gas}} = 2.157 \times 10^{-8}PL^4 - 9.866 \times 10^{-6}PL^3 + 0.001892PL^2 - 0.1897PL + 12.71 \quad (33-3)$$

۳-۴-۵ توربین گاز

چنانچه توربین گاز به عنوان محرک اولیه‌ی سیستم تولید همزمان انتخاب شود، راندمان توربین، دبی سوخت مصرفی و حرارت قابل بازیافت از آگزوز توربین گاز در بارهای جزئی را به ترتیب می‌توان از روابط (۳۴-۳) تا (۳۶-۳) تخمین زد [۴۰، ۸۱].

$$\frac{\eta_{GT,PL}}{\eta_{GT,nom}} = -2.551 \times 10^{-5}PL^2 + 0.01135PL + 0.1171 \quad (34-3)$$

همچنین دبی سوخت مصرفی توربین گاز در بار جزئی مطابق رابطه‌ی (۳۵-۳) قابل محاسبه است

[۸۱].

$$\frac{m_{\text{fuel,PL,GT}}}{m_{\text{fuel,nom,GT}}} = 0.4772 \exp(0.007565\text{PL}) - 0.2123 \exp(-0.02677\text{PL}) \quad (35-3)$$

رابطه‌ی (۳۶-۳) حرارت قابل بازیافت از گازهای داغ خروجی توربین را برحسب بار جزئی نشان می‌دهد [۸۱].

$$\frac{H_{\text{ex,PL,GT}}}{m_{\text{fuel,PL,GT}} \text{LHV}_{\text{gas}}} = 0.0061\text{PL} + 0.3868 \quad (36-3)$$

در روابط فوق، m نشان‌دهنده‌ی دبی جرمی سوخت برحسب kg/s و PL نشان‌دهنده‌ی درصد بار جزئی محرک اولیه است.

رابطه‌ی (۳۷-۳) قانون اول ترمودینامیک را نشان می‌دهد [۴۰]. قانون اول ترمودینامیک بیانگر اصل بقای انرژی است. به کمک این قانون تغییرات انرژی را می‌توان محاسبه نمود. به کمک روابط (۳۸-۳) و (۳۹-۳) و با معلوم بودن نسبت فشار کمپرسور، فشار و دمای پس از کمپرسور در بار نامی محاسبه می‌گردد [۴۰، ۸۲]. با محاسبه‌ی دمای قبل و بعد کمپرسور و مشخص بودن دبی هوای عبوری، کار کمپرسور توسط رابطه‌ی (۴۰-۳) به دست می‌آید [۶۶]. در رابطه‌ی (۴۰-۳) هر چه دمای ورودی به کمپرسور (T_1) کمتر باشد، کار کمپرسور نیز کمتر شده و در نهایت توان خالص خروجی از سیکل توربین گاز افزایش می‌یابد. از این رو برای کاهش این پارامتر از روش‌های متفاوت خنک‌کاری استفاده می‌شود. یکی از روش‌های مرسوم خنک‌کاری، استفاده از روش تبخیری به کمک سیستم مدیا است که تأثیر این پارامتر نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta \dot{E} \quad (37-3)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = r_p \quad (38-3)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = (r_p)^{\frac{k-1}{k}} \quad (39-3)$$

$$\dot{W}_{\text{Com}} = \dot{m}_{\text{air}} \times [h_2 - h_1] = \dot{m}_{\text{air}} (C_{p,2} \times T_2 - C_{p,1} \times T_1) \quad (40-3)$$

حرارت مورد نیاز برای رسیدن به دمای مطلوب طی رابطه‌ی (۳-۴۱) به دست می‌آید [۴۰]. دبی سوخت مصرفی در بار نامی نیز از رابطه‌ی (۳-۴۲) قابل محاسبه است [۸۲]. دبی جرمی گازهای عبوری از توربین برابر مجموع دبی هوا و سوخت است و از رابطه‌ی (۳-۴۳) به دست می‌آید [۸۴]. همچنین کار توربین نیز به کمک رابطه‌ی (۳-۴۴) محاسبه می‌شود [۸۳].

$$\dot{Q} = \dot{m}_{fuel} \times LHV \quad (۳-۴۱)$$

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{m}_{gas} \times C_{gas} \times (T_{out} - T_{in})}{LHV} \quad (۳-۴۲)$$

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} \quad (۳-۴۳)$$

$$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_{gas} \times [h_{in} - h_{out}] = \dot{m}_{gas} (C_p \times T_{in} - C_p \times T_{out}) \quad (۳-۴۴)$$

رابطه‌ی (۳-۴۵) و (۳-۴۶) به ترتیب میزان افت فشار در دهانه‌ی ورودی کمپرسور و محفظه‌ی احتراق را نشان می‌دهد [۸۲].

$$\Delta P_{airintake} = 0.008 P_{atm} \quad (۳-۴۵)$$

$$\Delta P_{CC} = 0.01 P_2 \quad (۳-۴۶)$$

۳-۴-۶ توربین بخار

چنانچه توربین بخار به عنوان محرک اولیه‌ی سیستم تولید همزمان انتخاب شود، راندمان توربین، دبی بخار، دما و فشار ورودی و خروجی، بخار قابل بازیافت از خروجی توربین بخار و کارکرد در بارهای جزئی به عنوان پارامترهای تأثیرگذار می‌بایست محاسبه گردد تغییرات این مقادیر باعث تغییر در مقدار آنتالپی، آنتروپی و سایر خواص آب و بخار می‌گردد که از نرم افزار EES این مقادیر فراخوانی خواهد شد.

رابطه ی (۳-۴۷) توان خالص خروجی از سیکل توربین بخار را نشان می دهد. توان خالص خروجی از سیکل تفاضل کار تولیدی توربین و کار مصرفی توسط پمپ می باشد. که رابطه ی (۳-۴۸) کار تولیدی توربین بخار و رابطه ی (۳-۴۹) کار مصرفی پمپ را نشان می دهد.

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_{Tur} - \dot{W}_{pump} \quad (۳-۴۷)$$

$$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_{water} \times [h_{in} - h_{out}] \quad (۳-۴۸)$$

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{water} \times [h_{in} - h_{out}] \quad (۳-۴۹)$$

در رابطه ی (۳-۴۸) و (۳-۴۹)، h آنتالپی سیال است که بر اساس دما و فشار سیال از نرم افزار EES فراخوانی می گردد. همچنین رابطه ی (۳-۵۰) حرارت ورودی به سیکل توسط بویلر را نشان می دهد. در نهایت راندمان تولید توان توسط سیکل بخار توسط رابطه ی (۳-۵۱) محاسبه می شود [۴۰].

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{fuel} \times LHV \times \eta_{boiler} \quad (۳-۵۰)$$

$$\eta_{steam\ turbine} = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_{in}} \quad (۳-۵۱)$$

راندمان کلی سیستم تولید همزمان نیز به کمک رابطه ی (۳-۵۲) قابل محاسبه است [۵۵].

$$\eta = \frac{E_{P,CHP} + Q_{H,CHP}}{\dot{m}_{fuel} \times LHV_{gas}} \times 100 \quad (۳-۵۲)$$

۳-۵ آنالیز اگزرژی

اگزرژی یک تحلیل ترمودینامیکی با توجه به کیفیت جریان انرژی است. از این رو اگزرژی را می توان به عنوان حداکثر کار نظری که از یک سیستم می توان به دست آورد، تعریف نمود [۷, ۸۵].

با تجزیه و تحلیل اگزرژی می‌توان میزان ناکارآمدی سیستم را مشخص نمود. همچنین به کمک آنالیز اگزرژی می‌توان مشخص نمود در کدام یک از محرک‌های اولیه بیشترین راندمان اگزرژی و کمترین میزان تخریب اگزرژی رخ می‌دهد [۸۶]؛ بنابراین با محاسبه‌ی میزان تخریب اگزرژی می‌توان طراحی سیستم را به سمت عملکرد سیستم در حالت نزدیک به برگشت‌پذیری بیشتر و کارآمد بالاتر سوق داد [۸۷].

آنالیز اگزرژی کمک می‌کند تا انحراف عملکرد سیستم از حد ایده آل مشخص گردد. اگزرژی هر سیستم نسبت به محیط در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین چنانچه سیستم به شرایط محیط رسیده باشد، آن را حالت مرده تعریف می‌کنند [۸۶].

متغیرهای مهم در آنالیز اگزرژی عبارت‌اند از [۸۸]:

- اگزرژی فیزیکی
- اگزرژی شیمیایی
- میزان تخریب اگزرژی
- راندمان اگزرژی

آنالیز اگزرژی، ابزاری مفید برای ظاهر کردن تفاوت بین تلفات انرژی با بازگشت‌ناپذیری‌های داخلی در یک سیستم است.

تحلیل اگزرژی، روشی مناسب برای سنجش کارکرد اجزای سیستم است. با این روش می‌توان اگزرژی نقاطی را که در آنها تبدیل انرژی صورت می‌گیرد را به دست آورد و راندمان اجزای سیکل را محاسبه کرد. همچنین می‌توان محل وقوع بیشترین تلفات را شناسایی و برای کاهش آنها تلاش کرد. آنالیز اگزرژی، بهترین ابزار برای تصمیم‌گیری در جهت بهینه‌سازی سیکل‌ها با توجه به داده‌های ورودی است [۳۴].

برای محاسبه‌ی انرژی حالت تعادلی سیستم در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو انرژی حجم کنترل

در حالت پایدار می‌تواند به صورت رابطه‌ی (۵۳-۳) تعریف شود [۷]:

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{CV} + \sum_i \dot{m}_i ex_i - \sum_e \dot{m}_e ex_e - \dot{E}x_d = 0 \quad (53-3)$$

در رابطه‌ی (۵۳-۳)، T دما، ex انرژی بر واحد جرم، \dot{Q}_j نرخ انتقال حرارت، \dot{W}_{CV} نرخ کار انجام

شده توسط حجم کنترل و $\dot{E}x_d$ میزان تخریب انرژی را نشان می‌دهد. همچنین زیر وند j شماره‌ی

تجهیز، \cdot نشان‌دهنده‌ی حالت محیط، i جریان ورودی و e جریان خروجی را نشان می‌دهد [۷].

انرژی فیزیکی در هر جریان جرم، در یک وضعیت خاص نسبت به محیط مطابق رابطه‌ی (۵۴-۳)

تعریف می‌شود [۷]:

$$ex^{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \left(\frac{V^2 - V_0^2}{2}\right) + g(Z - Z_0) \quad (54-3)$$

در رابطه‌ی (۵۴-۳)، h ، s ، v ، g و Z به ترتیب بیانگر آنتالپی ویژه، آنتروپی ویژه، سرعت، ضریب گرانش

و ارتفاع است. در این مطالعه به دلیل کم بودن مقادیر سرعت و ارتفاع، از این دو پارامتر صرف نظر شده

است [۷].

همچنین مقدار تغییرات آنتروپی به کمک رابطه‌ی (۵۵-۳) قابل محاسبه است [۴۰].

$$S_{out} - S_{in} = C_{p,ave} \times \ln \frac{T_{out}}{T_{in}} - R \times \ln \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (55-3)$$

از سوی دیگر، انرژی شیمیایی یک گاز منفرد در مخلوط چند گاز مطابق رابطه‌ی (۵۶-۳) محاسبه

می‌شود [۷]:

$$\bar{ex}_i^{ch} = x_i \bar{ex}_i^{ch,0} + RT_0 x_i \ln(x_i) \quad (56-3)$$

در رابطه‌ی (۳-۵۶)، x غلظت مولی یک گونه از گاز است. همچنین $\overline{ex}_i^{ch,0}$ اگزرژی استاندارد یک گونه است که از منابع [۷] و [۸۹] استخراج شده و در جدول (۳-۳) آورده شده است.

جدول (۳-۳): اگزرژی شیمیایی استاندارد گونه‌های مختلف گاز [۷, ۸۹]

انواع گاز	مقدار	یکا
$\overline{ex}_{H_2O}^{ch,0}$	۹/۵	kJ/mol
$\overline{ex}_{O_2}^{ch,0}$	۳/۹۷	kJ/mol
$\overline{ex}_{N_2}^{ch,0}$	۰/۷۲	kJ/mol
$\overline{ex}_{CO_2}^{ch,0}$	۱۹/۸۷	kJ/mol

راندمان اگزرژی به عنوان نسبت کل خروجی اگزرژی به ورودی اگزرژی تعریف می‌شود [۷, ۹۰]. برای یک سیستم CCHP راندمان اگزرژی مطابق رابطه‌ی (۳-۵۷) تعریف می‌گردد [۷, ۵۲].

$$\eta_{ex,CCHP} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{Heat}}\right) \dot{Q}_{heat} + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{Cool}}\right) \dot{Q}_{Ch}}{\dot{E}x_f} \quad (۳-۵۷)$$

در معادله (۳-۵۷)، $\eta_{ex,CCHP}$ بازده اگزرژی سیستم CCHP است و \dot{W}_{net} خروجی توان خالص سیستم تولید همزمان است. T_{Cool} و T_{Heat} دمای متوسط است که انتقال گرما به ترتیب در مرزهای سیستم برای گرمایش و سرمایش رخ می‌دهد. علاوه بر این، میزان اگزرژی سوخت است که از رابطه‌ی (۳-۵۸) به دست می‌آید [۹۱]:

$$\dot{E}x_f = \dot{m}_f \times ex_f \quad (۳-۵۸)$$

که در رابطه‌ی (۳-۵۸)، ex_f اگزرژی شیمیایی خاص سوخت بوده و از رابطه‌ی (۳-۵۹) به دست می‌آید [۹۱]:

$$ex_f = \varphi \times LHV \quad (۳-۵۴)$$

پارامتر φ برای گاز طبیعی برابر $1/0.4$ در نظر گرفته شده است [۹۱].

میزان تخریب انرژی در هر جزء از تجهیزات نیز از رابطه‌ی (۳-۶۰) محاسبه می‌شود [۸۶]:

$$\dot{E}X_{d,k} = \dot{E}X_{i,k} - \dot{E}X_{e,k} \quad (۳-۶۰)$$

در رابطه‌ی (۳-۶۰)، $\dot{E}X_{d,k}$ میزان تخریب انرژی در هر یک از تجهیزات و k شمارنده‌ی تجهیزات است.

۳-۶ آنالیز اقتصادی

مهم‌ترین آنالیزی که در زمینه‌ی احداث و جایگزینی یک سیستم مطرح می‌گردد آنالیز اقتصادی است. آنالیز اقتصادی به عنوان تکنیک‌های مقایسه، تصمیم‌گیری و انتخاب از میان راه‌حل‌ها، بر اساس شرایط مطلوب پولی و اقتصادی تعریف می‌شود. به‌طور کلی استفاده از این تحلیل دارای اهمیت اساسی است، زیرا میزان سود یا ضرر حاصل از کیفیت روش انتخاب شده، به استفاده‌ی مناسب از این تکنیک بستگی دارد [۲۴].

عموماً به منظور ارزیابی اقتصادی سیستم‌ها دو روش به کار گرفته می‌شود. این دو روش شامل ارزیابی استاتیکی^۱ و ارزیابی دینامیکی^۲ است. ارزیابی استاتیکی بر پایه‌ی معیارهایی است که در برگیرنده‌ی عمر مفید سیستم و نرخ بهره نیست اما ارزیابی دینامیکی این دو عامل را نیز مد نظر قرار می‌دهد [۹۲].

پس از اینکه مشخص گردید سیستم پیشنهادی از نظر فنی و زیست‌محیطی نسبت به سیستم‌های سنتی دارای عملکردی بهتری است، مباحث اقتصادی به میان می‌آید. با توجه به اینکه احداث و اجرای سیستم جایگزین نیازمند صرف هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری و غیره است، بایستی

^۱ Static Analysis

^۲ Dynamic Analysis

بررسی گردد آیا درآمدها و صرفه‌جویی سیستم پیشنهادی این هزینه‌ها را در طول عمر خود جبران می‌کند یا خیر؟

به این منظور در بخش آنالیز اقتصادی سیستم تولید همزمان پیشنهادی، کلیه هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملکردی ناشی از خرید برق و سوخت، هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و اسقاطی مد نظر قرار گرفته است و به شرح زیر آورده شده است.

۳-۶-۱ هزینه‌های احداث و اسقاطی

هزینه‌های احداث هر سیستم شامل هزینه‌های خرید و سرمایه‌گذاری اولیه بوده که در ابتدای راه‌اندازی سیستم به کار می‌رود. هزینه‌ی احداث سیستم تولید مجزا شامل هزینه‌های خرید بویلر گرمایشی و چیلر تراکمی است. همچنین در یک سیستم تولید همزمان، هزینه‌ی احداث، شامل هزینه‌های خرید محرک اولیه، بویلر پشتیبان، بازیاب و غیره است. اطلاعات لازم برای محاسبه‌ی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه تجهیزات سیستم تولید همزمان و مجزا در جدول (۳-۳) آورده شده است [۲۴]. در جدول (۳-۴)، E_{nom} ظرفیت محرک اولیه، H_B ظرفیت حرارتی بویلر است.

جدول (۳-۴): هزینه اولیه‌ی تجهیزات [۲۴، ۸۱]

تجهیزات	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (\$/kW)
توربین بخار	$C = -82.42 \times \ln(E_{nom}) + 1142$
توربین گاز	$C = -0.014E_{nom} + 600$
موتور گازسوز	$C = -138.7 \ln(E_{nom}) + 1727.1$
بازیاب	$C = 30,100 \text{ \$}$
بویلر	$C = 205H_B^{-0.13}$

رابطه‌ی (۳-۶۱) نشان دهنده‌ی مجموع ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری در زمان احداث سیستم

است [۱۲].

$$NPWC = \sum_{j=1}^N (C \times NC)_j = 0 \quad (61-3)$$

در رابطه‌ی (۶۱-۳)، NPWC ارزش فعلی خالص هزینه‌های اولیه^۱ است که برابر مجموع هزینه‌های خرید هریک از تجهیزات است. همچنین، C هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بر واحد ظرفیت هریک از تجهیزات است که در جدول (۳-۳) آورده شده است. NC نیز ظرفیت نامی هریک از تجهیزات را نشان می‌دهد که به کمک روابط بخش آنالیز انرژی بدست می‌آید و J نیز شمارنده‌ی تجهیزات است. همچنین هزینه‌ی احداث تجهیزات، توسط رابطه‌ی (۶۲-۳)، سالیانه می‌شود [۲۲]:

$$R = \beta \times NPWC \quad (62-3)$$

که β ضریب سالیانه کننده است و به دو پارامتر نرخ بهره i و طول عمر سیستم، n بستگی دارد. این پارامتر با رابطه‌ی (۶۳-۳) ارزیابی می‌شود [۶۴]:

$$\beta = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (63-3)$$

هزینه سالیانه یکنواخت را می‌توان با در نظر گرفتن هزینه اولیه و هزینه اسقاطی مطابق رابطه‌ی (۳-۶۴) (۶۴) تعریف نمود. در رابطه‌ی (۶۴-۳)، SV هزینه سالانه اسقاطی است و از رابطه‌ی (۳-۶۵) به دست می‌آید [۲۴، ۸۱، ۹۳-۹۵]:

$$EUAC = R - SV \quad (64-3)$$

$$SV = 0.2 \times NPWC \quad (65-3)$$

ارزش فعلی درآمدها، شامل درآمد ناشی از هزینه‌های اسقاطی تجهیزات SV و درآمد سالانه سیستم است که با A نشان داده شده است و توسط رابطه‌ی (۳-۶۶) و (۳-۶۷) قابل ارزیابی است [۲۴، ۹۵]:

$$NPWB = A \times \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] + SV \times \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (66-3)$$

^۱ Net present Worth of Cost investment

$$A(\$) = \sum_{n=1}^n \left[\sum_{t=1}^{8760} (E_s \times \mu_{e,s}) \times \tau + R_{C \& O \text{ and } M} \right] \quad (3-67)$$

در رابطه‌ی (۳-۶۷)، $\mu_{e,s}$ قیمت فروش الکتریسیته و $R_{C \& O \text{ and } M}$ میزان کاهش هزینه‌های اولیه، هزینه‌های عملکردی، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم سنتی است. نکته‌ی قابل توجه در این روابط در نظر گرفتن نرخ بهره و هزینه‌های اسقاطی است که با روش ارزش فعلی هزینه‌ها همسنگ سازی شده است [۲۴].

۳-۶-۲ هزینه‌های تعمیر و نگهداری

هریک از تجهیزات بر اساس میزان ساعت کاری خود، نیازمند بازدیدهای دوره‌ای و در صورت نیاز تعویض و یا تعمیر قطعات هستند. هزینه‌های تعمیر و نگهداری شامل مواردی همچون تعمیرات اساسی، تعویض قطعاتی مانند فیلتر هوا، فیلتر روغن، تعویض پره‌های توربین و اورهال نمودن و غیره و همچنین بازرسی‌های متداول و نیروی کار انسانی می‌شود که به صورت تابعی از ساعت کاری و ظرفیت نامی تجهیزات تخمین زده می‌شود. طبق محاسبات ساعت کاری در این پژوهش ۲۴۰۰ ساعت در سال محاسبه شده است و طول عمر تجهیزات نیز برابر ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. اطلاعات لازم برای محاسبه‌ی هزینه‌های تعمیرات و نگهداری در جدول (۳-۵) آورده شده است.

جدول (۳-۵): هزینه تعمیرات و نگهداری تجهیزات [۸۱، ۲۴]

تجهیزات	هزینه تعمیر و نگهداری
توربین بخار	$M = 0.009 \text{ \$/kWh}$
توربین گاز	$M = 0.0055 \text{ \$/kWh}$
موتور گازسوز	$M = 0.1696 \times E_{nom}^{-0.2} \left(1 - 0.6875 \frac{E}{E_{nom}} \right) \text{ \$/kWh}$
بازیاب	$M = 245 \text{ \$/year}$
بویلر	$M = 0.0027 \text{ \$/kWh}$

۳-۶-۳ هزینه‌های عملکردی و درصد کاهش هزینه‌های عملکردی^۱

هزینه‌های عملکردی به عنوان هزینه‌هایی که در طول بازه‌ی استفاده از تجهیزات صرف می‌شود، تعریف می‌شود. هزینه‌ی عملکردی شامل خرید گاز طبیعی و برق از شبکه برای هر دو حالت سیستم تولید مجزا و سیستم تولید همزمان می‌شود [۲۳].

درصد کاهش هزینه‌های عملکردی از رابطه‌ی (۳-۶۸) محاسبه می‌شود [۲۳].

$$CR = \frac{Cost^{SP} - Cost^{CCHP}}{Cost^{SP}} \quad (۳-۶۸)$$

هزینه‌ی عملکرد سیستم تولید جداگانه مطابق با رابطه‌ی (۳-۶۹) به دست می‌آید [۲۳].

$$Cost^{SP} = Cost_E E_{Grid}^{SP} + Cost_{fuel}^{SP} F_{Boiler} \quad (۳-۶۹)$$

هزینه‌ی عملکرد سیستم تولید همزمان در حالت عدم فروش برق به شبکه و در حالت فروش برق به شبکه به ترتیب از روابط (۳-۷۰) و (۳-۷۱) قابل محاسبه است [۲۳]:

$$Cost^{CCHP} = Cost_E E_{Grid}^{CCHP} + Cost_{fuel}^{CCHP} F_{on-site} \quad (۳-۷۰)$$

$$Cost^{CCHP} = Cost_E E_{Grid}^{CCHP} + Cost_{fuel}^{CCHP} F_{on-site} - Cost_{exp} E_{exp}^{CCHP} \quad (۳-۷۱)$$

۳-۶-۴ درصد کاهش مصرف سوخت

با توجه به اینکه سیستم‌های تولید همزمان تنها از یک منبع حرارتی برای تأمین برق و حرارت استفاده می‌کنند، نسبت به سیستم‌های تولید مجزا سوخت کمتری مصرف می‌کنند. پارامتر صرفه‌جویی در مصرف سوخت مطابق رابطه‌ی (۳-۷۲) ارزیابی می‌شود [۱۷]:

$$FESR = \frac{fuel_{SP} - fuel_{CCHP}}{fuel_{SP}} \times 100 \quad (۳-۷۲)$$

^۱ Operational Cost Reduction (CR)

که در رابطه‌ی (۷۲-۳)، $fuel_{CCHP}$ و $fuel_{SP}$ به ترتیب سوخت مصرفی سیستم تولید جداگانه و سیستم تولید همزمان را نشان می‌دهد [۱۷].

۳-۶-۵ بازگشت سرمایه

دوره‌ی بازگشت سرمایه مدت زمانی است که سرمایه‌ی اولیه بتواند توسط درآمدهای سالیانه جبران شود. همواره سرمایه‌گذاران مشتاق‌اند از مدت زمان بازگشت سرمایه آگاه باشند و تمایل به سرمایه‌گذاری در پروژه‌هایی دارند که کمترین دوره‌ی بازگشت سرمایه را داشته باشد؛ بنابراین محاسبه‌ی دقیق آن نقش اساسی در اقتصاد این سیستم‌ها خواهد داشت [۲۴].

۳-۶-۵-۱ محاسبه‌ی دوره‌ی بازگشت سرمایه به روش سنتی

محاسبه‌ی دوره بازگشت سرمایه به روش سنتی، یک روش تقریبی و سریع برای مقایسه اقتصادی پروژه‌ها است که از رابطه‌ی (۷۳-۳) به دست می‌آید [۹۵].

$$-p + \sum_{n=1}^{PB} CF_n = 0 \quad (73-3)$$

در رابطه‌ی (۷۳-۳)، p و CF_n به ترتیب هزینه اولیه و فرایند مالی سیستم در پایان سال n ام است. فرایند مالی شامل کلیه‌ی هزینه‌های سیستم و صرفه‌جویی در مصرف سوخت و در صورت امکان درآمدهای ناشی از فروش برق به شبکه است. اگر درآمدها در پایان هر سال برابر باشند دوره‌ی بازگشت سرمایه به صورت رابطه‌ی (۷۴-۳) ساده می‌شود [۹۶]:

$$PB = \frac{p}{CF} \quad (74-3)$$

۳-۶-۵-۲ محاسبه‌ی دوره‌ی بازگشت سرمایه به روش کلاسیک

در محاسبه‌ی دوره‌ی بازگشت سرمایه به روش سنتی ارزش زمانی پول و ارزش اسقاطی تجهیزات در نظر گرفته نمی‌شود و به همین دلیل نتایج حاصل از آن‌ها دقیق نبوده و به عنوان روش تقریبی

معرفی می‌شود. در روش دوره‌ی بازگشت سرمایه به روش کلاسیک موارد نام برده نیز مد نظر قرار می‌گیرد و مطابق رابطه‌ی (۷۵-۳) تعریف می‌شود [۲۴]:

$$\begin{cases} NPWB(n) - NPWC(n) = 0 \\ PB = n \end{cases} \quad (75-3)$$

در این روش مدت زمان بازگشت سرمایه، زمانی خواهد بود که ارزش فعلی هزینه‌های اولیه^۱ و ارزش خالص درآمدها^۲ در پایان آن سال با هم برابر شوند.

^۱ Net Present Worth of Cost Investment (NPWC)

^۲ Net Present Worth Benefit (NPWB)

فصل چهارم:

شبیه‌سازی و ارائه نتایج

۱-۴ مقدمه

در فصل سوم روابط حاکم بر سیستم تولید همزمان، محرک اولیه و سایر اجزای یک سیستم تولید همزمان مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل سیستم تولید همزمان با محرک اولیه توربین بخار برای کاربری کارخانه‌ی قند و شکر شاهرود تحت شش سناریوی پیشنهادی به کمک روابط حاکم مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم مورد نظر توسط کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و خواص آب و بخار از نرم افزار EES فراخوانی شده است. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل انرژی، انرژی و اقتصادی آورده شده است.

۲-۴ شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار متلب

جهت شبیه‌سازی سیستم‌های تولید همزمان در نرم‌افزار متلب می‌بایست مقادیر و روابط مورد نیاز برای محاسبه بهترین نقطه عملکردی را به عنوان ورودی به نرم‌افزار متلب معرفی نمود. روابط مندرج در فصل ۳ و مقادیر جدول (۱-۴) پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۴): پارامترهای ورودی نرم‌افزار متلب [۹۷، ۸۲، ۲۴]

پارامتر	مقدار	یکا
فشار اتمسفر	۱۰۱/۳۲۵	kPa
دمای محیط	۵- تا ۳۵	C
ارزش حرارتی پایین گاز طبیعی	۴۹۳۰۳	kJ/kg
راندمان ژنراتور	۹۵	%
راندمان بویلر	۸۰	%
راندمان بازیاب	۸۵	%
طول عمر تجهیزات	۲۰	سال
نرخ بهره	۲۰	%

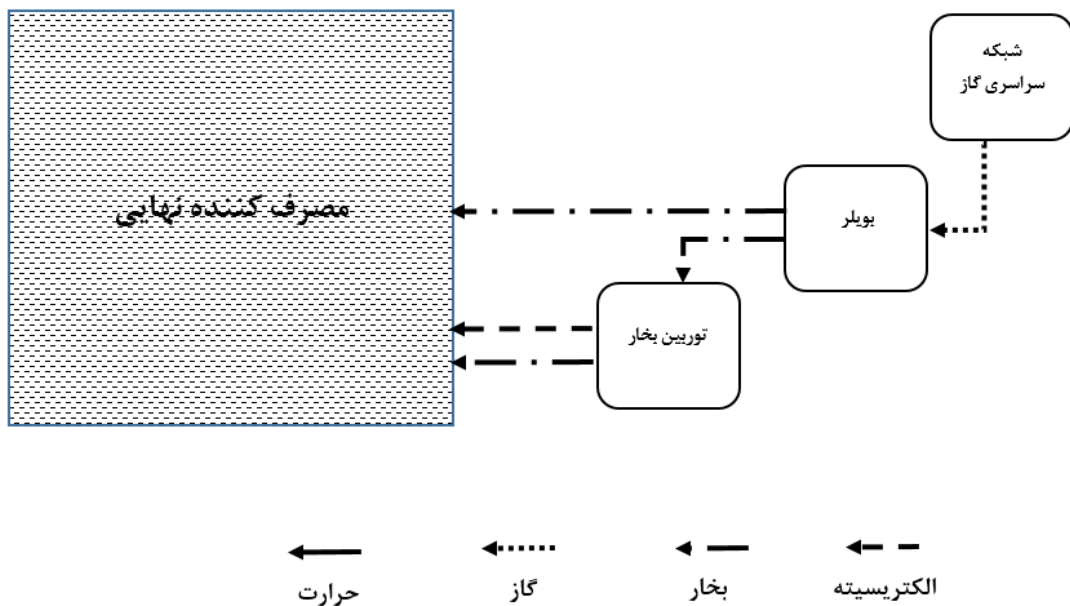
۳-۴ مطالعه‌ی موردی

از آنجایی که کارخانه قند و شکر جهت انجام فرایند تولید محصول خود به طور همزمان نیازمند توان و بخار است؛ یکی از گزینه‌های مطرح برای نصب سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت خواهد بود. در فصل ۱ به معرفی سیستم تولید همزمان و فواید استفاده از آن پرداخته شد. سیستم‌های تولید همزمانی که غالباً مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل یک محرک اولیه است. در این پژوهش نیز سیستم تولید همزمان با محرک توربین بخار، توربین گاز و موتور گازسوز تحت ۶ سناریو برای کاربری کارخانه قند و شکر شاهرود معرفی گردید. شکل‌های (۱-۴) تا (۴-۴) شماتیک سیستم‌های تولید همزمان پیشنهادی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

در شبیه‌سازی سیستم مورد بررسی، برق تولیدی و حرارت دریافتی از سیستم برابر مجموع برق و حرارت دریافتی از توربین گاز، توربین بخار، موتور گازسوز و بویلر بوده و همچنین سوخت مصرفی برابر مجموع سوخت مورد استفاده در توربین گاز، موتور گازسوز و بویلر خواهد بود.

۳-۴-۱ سناریو ۱: توربین بخار

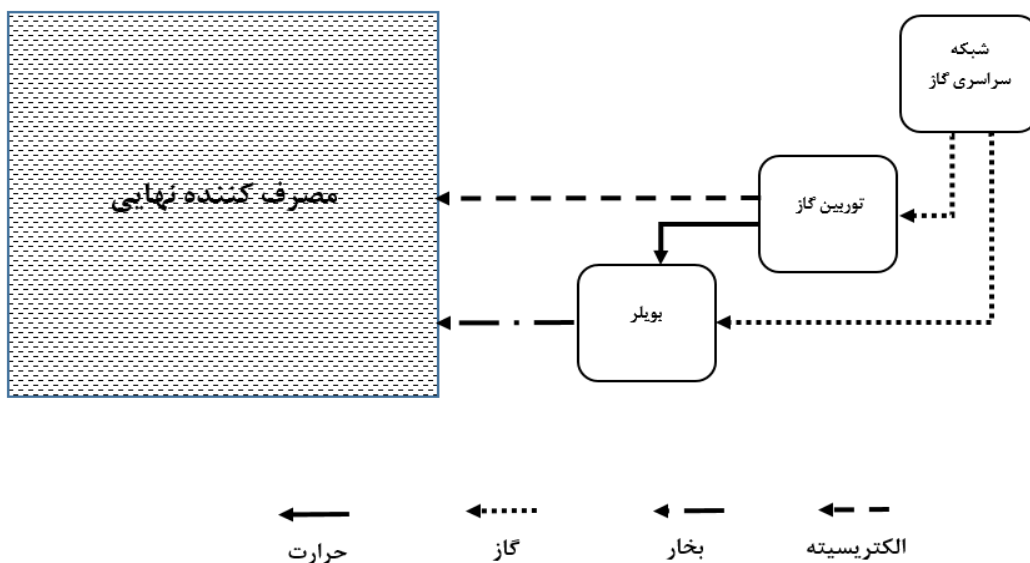
سناریو ۱ در واقع ترکیبی است که در حال حاضر در کارخانه نصب و در حال استفاده است. این سیستم شامل بویلر تولید بخار جهت تولید بخار مورد نیاز برای توربین بخار و فرایندهای تولید است. توربین بخار به کمک بخار با فشار و دمای بالا تولید توان نموده و برق مورد نیاز تجهیزات را فراهم می‌کند. سپس بخار خروجی از توربین بخار با بخار تولید شده توسط بویلر ترکیب شده و وارد فرایند تولید می‌گردد. شکل (۱-۴) شماتیک سیستم را در حالت سناریو ۱ نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۱

۴-۳-۲ سناریو ۲: توربین گاز

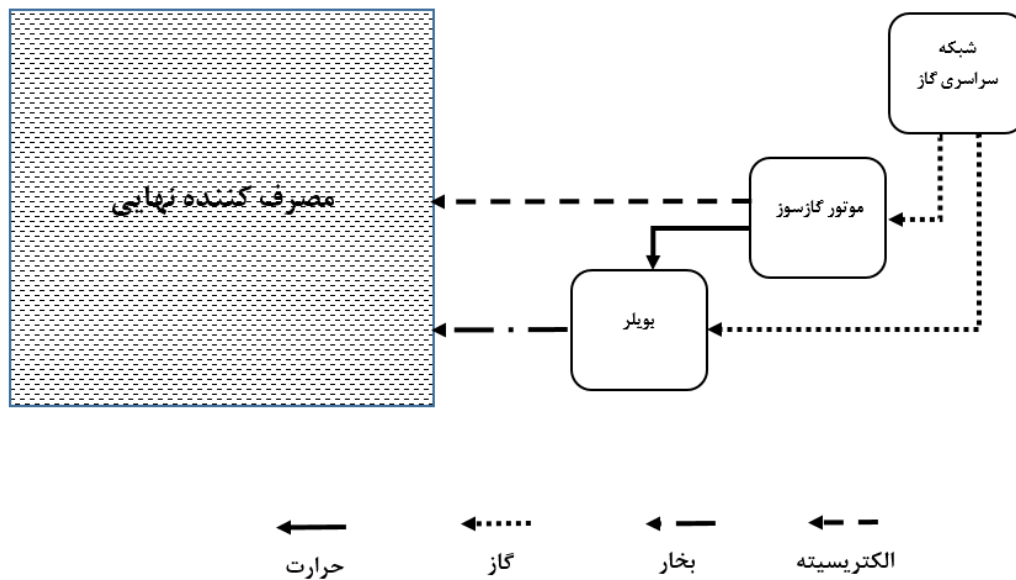
سناریو ۲ ترکیبی از توربین گاز و بویلر جهت تولید بخار است که در یک سیستم تولید همزمان ایفای نقش می‌نمایند. توربین گاز جهت تولید مورد نیاز مجموعه و بویلر جهت تولید بخار در فرایند تولید محصولات کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۴-۲) شماتیک سیستم تولید همزمان با محرک توربین گاز و بویلر را در حالت سناریو ۲ نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۲

۳-۳-۴ سناریو ۳: موتور گازسوز

سناریو ۳ ترکیبی از موتور گازسوز و بویلر جهت تولید بخار است که در یک سیستم تولید همزمان ایفای نقش می‌نماید. موتور گازسوز جهت تولید توان مورد نیاز مجموعه و بویلر جهت تولید بخار در فرایند تولید محصولات کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۳-۴) شماتیک سیستم تولید همزمان با محرک موتور گازسوز و بویلر را در حالت سناریو ۳ نشان می‌دهد.

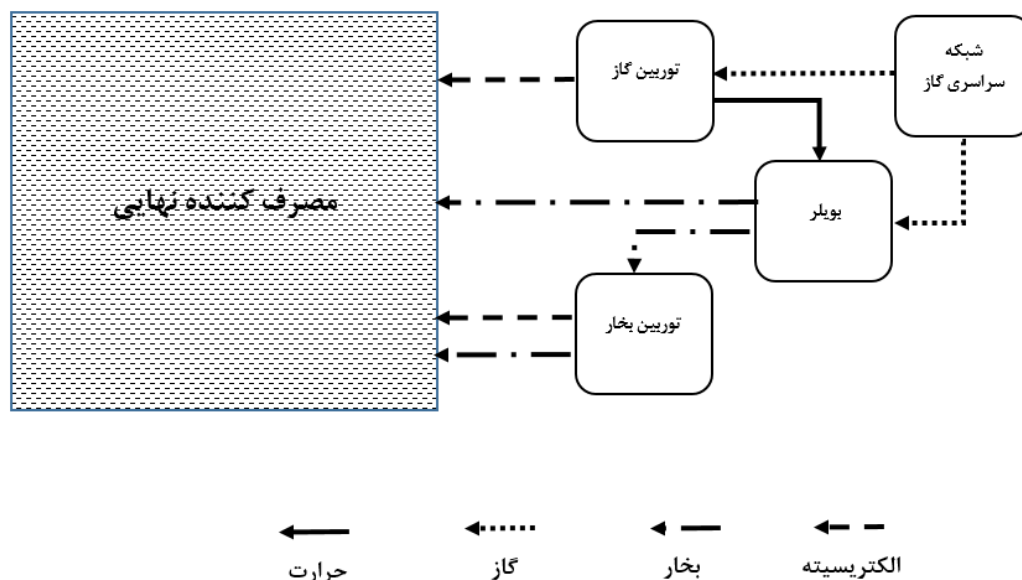


شکل (۳-۴): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۳

۳-۳-۴ سناریو ۴: توربین گاز + توربین بخار

سناریو ۴ در واقع به عنوان ترکیبی از سناریو ۱ و ۲ معرفی شده است. در این حالت ابتدا سوخت در توربین گاز سوزانده شده و بخشی از توان مورد نیاز مجموعه تولید می‌گردد. سپس گازهای داغ خروجی از توربین گاز به عنوان حرارت ورودی بویلر جهت تولید بخار دما و فشار بالا استفاده می‌شود. چنانچه حرارت ناشی از اگزوز توربین گاز کمتر از میزان مورد نیاز باشد مابقی آن از طریق سوزاندن سوخت در بویلر پشتیبان فراهم گردید. سپس بخار تولید شده با دما و فشار بالا وارد توربین بخار شده و مابقی توان مورد نیاز را فراهم می‌کند. سپس بخار خروجی از توربین بخار با بخار تولید شده توسط بویلر

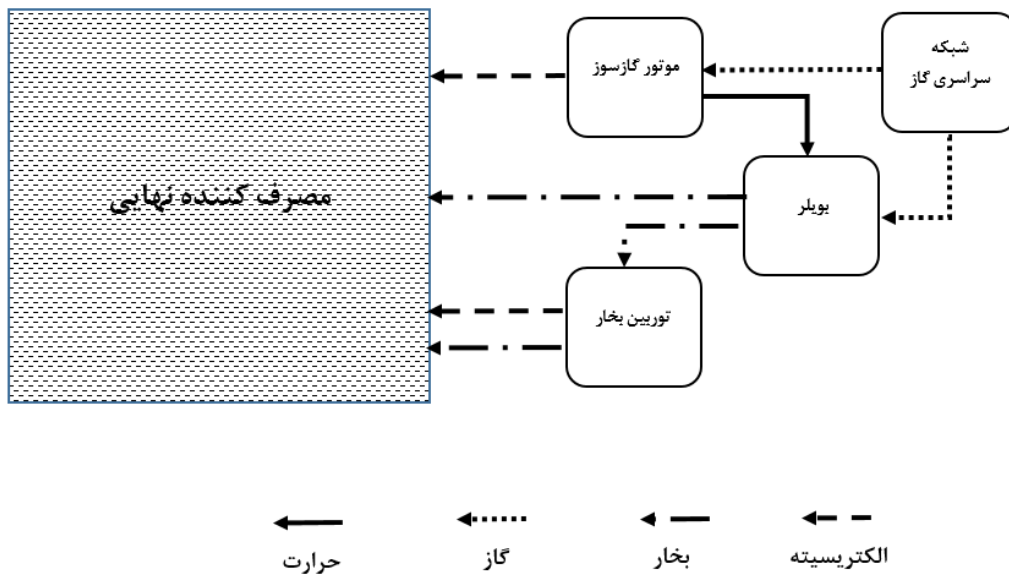
ترکیب شده و وارد فرایند تولید محصول می‌گردد. شکل (۴-۴) شماتیک سیستم را در حالت سناریو ۴ نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۴

۴-۳-۵ سناریو ۵: موتور گازسوز+توربین بخار

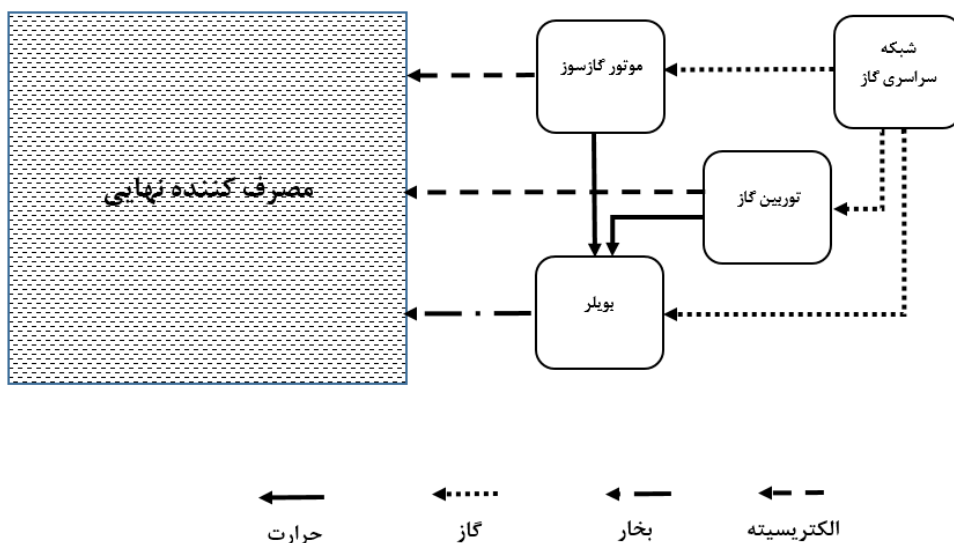
سناریو ۵ در واقع به عنوان ترکیبی از سناریو ۱ و ۳ معرفی شده است. در این حالت ابتدا سوخت در موتور گازسوز سوزانده شده و بخشی از توان مورد نیاز مجموعه تولید می‌گردد. سپس گازهای داغ خروجی از موتور گازسوز به عنوان حرارت ورودی بویلر جهت تولید بخار دما و فشار بالا استفاده می‌شود. چنانچه حرارت بازیافتی از موتور گازسوز کمتر از میزان مورد نیاز باشد مابقی آن از طریق سوزاندن سوخت در بویلر پشتیبان فراهم گردید. سپس بخار تولید شده با دما و فشار بالا وارد توربین بخار شده و مابقی توان مورد نیاز را فراهم می‌کند. سپس بخار خروجی از توربین بخار با بخار تولید شده توسط بویلر ترکیب شده و وارد فرایند تولید محصول می‌گردد. شکل (۴-۵) شماتیک سیستم را در حالت سناریو ۵ نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵): شماتیک سیستم تولید همزمان مورد بررسی در سناریو ۵

۴-۳-۶ سناریو ۶: موتور گازسوز+توربین گاز

سناریو ۶ ترکیب موتور گازسوز، توربین گاز و بوiler را جهت تولید توان و بخار برای تولید محصول در کارخانه‌ی قند و شکر نشان می‌دهد. شکل (۴-۶) شماتیک سیستم را در حالت سناریو ۶ نشان می‌دهد. در این سناریو ابتدا سوخت در موتور گازسوز و توربین گاز سوزانده شده و توان تولیدی مورد نیاز تولید می‌گردد. سپس حرارت بازیافتی از این دو محرک جهت تولید بخار برای فرایندهای تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد.



۴-۴ ارائه نتایج

در این بخش نتایج حاصل از سیستم تولید همزمان با محرک اولیه‌ی توربین گاز، توربین بخار، موتور گازسوز و در ۳ حالت سیکل ترکیبی ارائه شده است.

۴-۴-۱ اعتبارسنجی

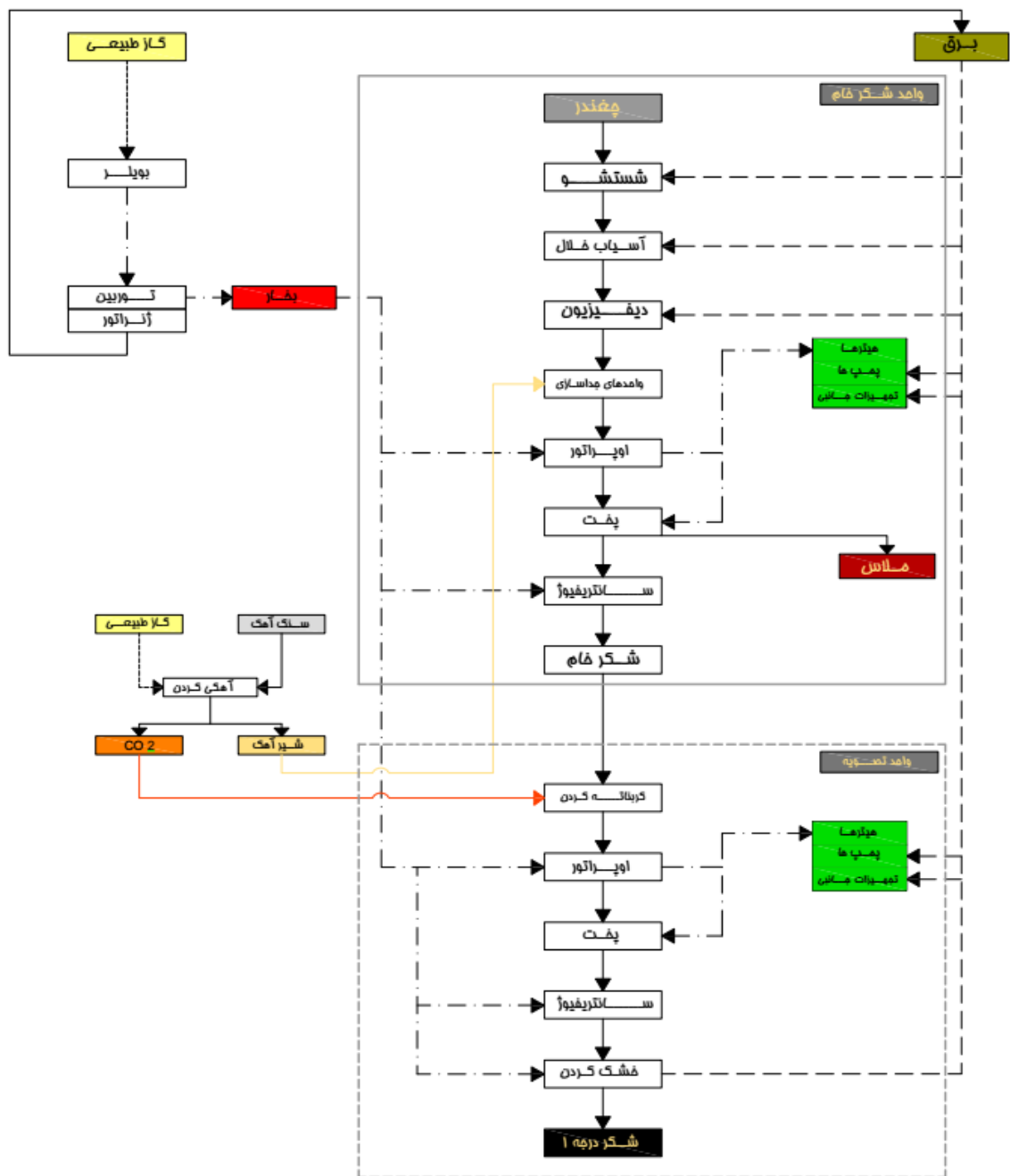
در این بخش نتایج حاصل از هر ۶ سناریو مطرح شده با پژوهش‌های مشابه پیشین مقایسه شده است. جدول (۴-۴) خلاصه‌ی نتایج حاصل از اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده تطابق خوبی با پژوهش‌های پیشین دارد.

جدول (۴-۴): خلاصه نتایج اعتبارسنجی

مرجع [۹۸]	مرجع [۹۲]	مرجع [۵۵]	مرجع [۸۰]	کار حاضر						سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ۶	
				توربین بخار	توربین گاز	موتور گازسوز	توربین بخار	توربین گاز	موتور گازسوز							
راندمان انرژی	۷۹/۲۸	۶۲/۵۳	۷۸/۲۸	۷۴/۷۸	۸۰/۵۵	۷۰/۶۹	۷۹	۶۰	۸۰	۸۷	۷۵	۶۵	توربین بخار + توربین گاز	موتور گازسوز + توربین بخار	موتور گازسوز + توربین بخار	موتور گازسوز + توربین بخار
راندمان آگرزژی	۵۸/۳۶	۳۳/۳۵	۴۸/۹۶	۲۴/۵۹	۲۶/۶۴	۳۶/۷۱	۴۶	۳۰	۵۸	۶۲/۸	۳۷	۳۷	توربین بخار	توربین گاز	موتور گازسوز	موتور گازسوز
درصد کاهش مصرف سوخت	۳۷	۱۸	۳۴	۲۶	۴۱	۲۲	۳۷	۲۰	۳۸	۴۹	۱۵	۴۵	توربین بخار	توربین گاز	موتور گازسوز	موتور گازسوز
درصد کاهش هزینه‌های عملکردی	۴۰	۳۷	۴۸	۴۰	۵۵	۳۶	۴۱	۳۰	۴۲	۸۰	۶۲	۶۲	توربین بخار	توربین گاز	موتور گازسوز	موتور گازسوز
دوره‌ی بازگشت سرمایه	۷	۸/۹	۷/۵	۷/۹	۶/۳	۸/۶	۷/۲	۹	۷	۶/۳	۹	۹	توربین بخار	توربین گاز	موتور گازسوز	موتور گازسوز

۴-۴-۲ نتایج آنالیز انرژی

در ابتدای آنالیز انرژی می‌بایست دیاگرام انرژی را مورد بررسی قرار داد. شکل (۴-۷) دیاگرام انرژی کارخانه قند و شکر شاهرود را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود قسمت سمت راست دیاگرام انرژی شامل مراحل و تجهیزات تولید قند و شکر است که نمی‌توان تغییری در آن ایجاد نمود. این تجهیزات مصرف کننده‌ی برق و حرارت بوده که توسط قسمت سمت چپ نمودار تأمین می‌گردد. این قسمت تحت سناریوهای مختلف بیان شده می‌تواند تأمین برق و حرارت می‌نماید که در ادامه نتایج حاصل از هر سناریو آورده شده است.

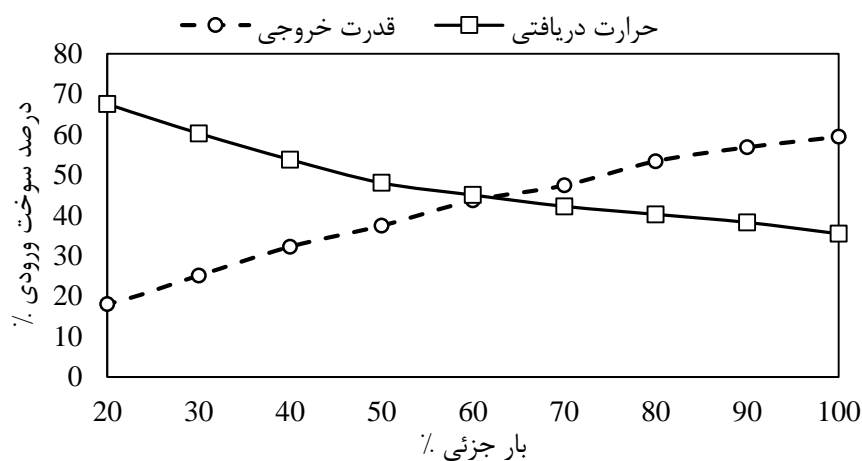


شکل (۴-۷): دیاگرام انرژی کارخانه قند و شکر شاهرود

مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر عملکرد سیستم تولید همزمان، عملکرد محرک‌های اولیه برحسب بار جزئی هر محرک است. شکل‌های (۴-۸) تا (۴-۱۰) به ترتیب تغییرات نسبت توان تولیدی و حرارت قابل دریافت از محرک اولیه را به عنوان دو شاخص اصلی سیستم تولید همزمان برحسب بار جزئی برای

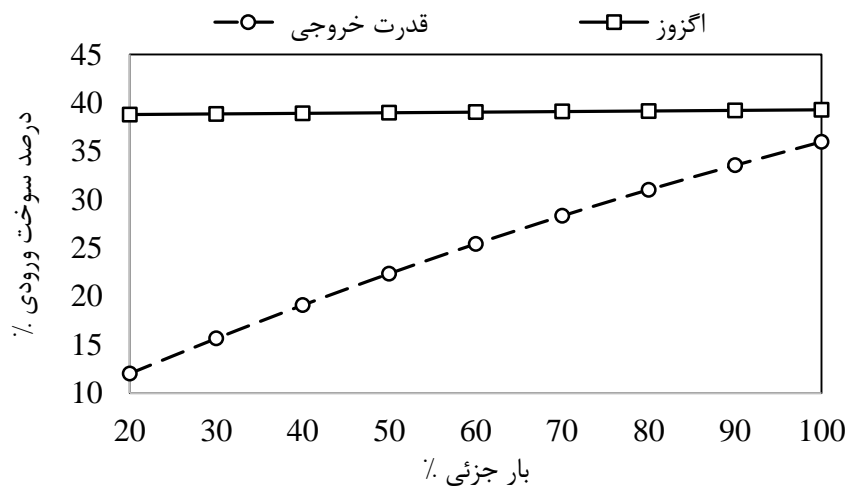
توربین بخار، توربین گاز و موتور گازسوز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محور افقی درصد بار جزئی محرک اولیه را نشان می‌دهد. همچنین محور عمودی بیانگر درصد سوخت مصرفی است.

شکل (۸-۴) حرارت و قدرت خروجی توربین بخار را بر حسب بارهای جزئی محرک اولیه نشان می‌دهد. در بارهای جزئی کمتر از ۶۰ درصد میزان بیشتری از سوخت مصرفی به حرارت دریافتی تبدیل می‌شود و در بارهای نزدیک به بار کامل حرارت و بخار ورودی به کار تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه کار خروجی ارزشمند بوده و هدف تولید است، سعی بر آن است تا سیستم به گونه‌ای طراحی گردد تا در بارهای کامل ایفای نقش نماید. در بار جزئی حرارت، دما و فشار بالای بخار ورودی از انتهای توربین خارج می‌گردد و کار کمتری تولید خواهد شد.



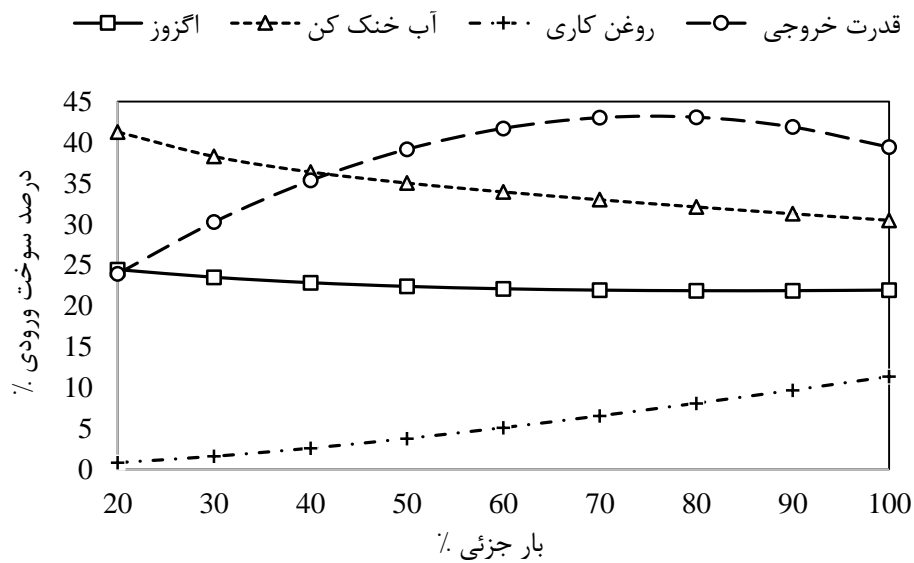
شکل (۸-۴): شاخص‌های فنی توربین بخار بر حسب بار جزئی

شکل (۹-۴) نشان می‌دهد که در یک توربین گاز در بارهای جزئی متفاوت چند درصد از سوخت ورودی به توان و چند درصد از این سوخت ورودی به حرارت اگزوز تبدیل شده است. در بارهای متفاوت، به دلیل ثابت بودن دمای ورودی و خروجی از محفظه احتراق و توربین، حرارت خروجی از اگزوز ثابت بوده و به صورت افقی نشان داده شده است. در بارهای جزئی پایین‌تر درصد کمتری از سوخت ورودی به توان تبدیل می‌گردد. با افزایش میزان بار توربین گاز، درصد بیشتری از سوخت ورودی به توان تبدیل شده است.



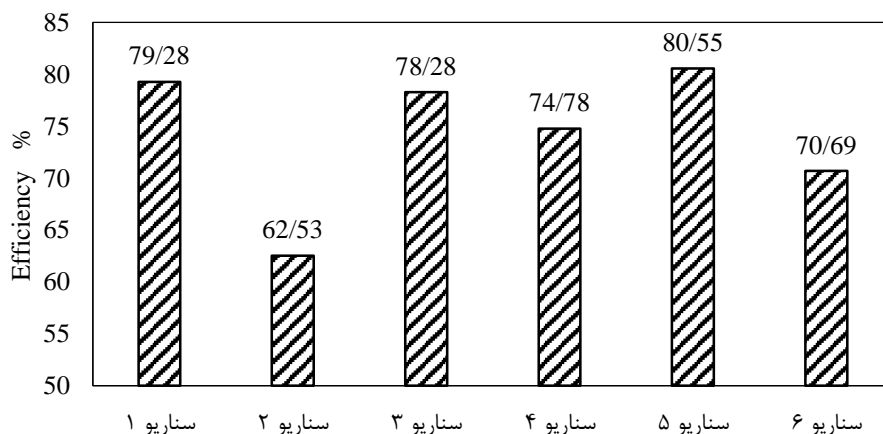
شکل (۹-۴): شاخص‌های فنی توربین گاز برحسب بار جزئی

شکل (۱۰-۴) این تغییرات را برای موتور گازسوز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در موتور گازسوز مقداری از سوخت مصرفی در محرک اولیه به روغن روانکار و ژاکت خنک‌کننده‌ی موتور گازسوز منتقل شده است. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که قدرت خروجی موتور گازسوز با افزایش بار جزئی افزایش یافته و درصد بیشتری از سوخت ورودی به توان تبدیل شده است؛ اما با گذشت بار از ۸۰٪ بار جزئی مجدداً توان تولیدی کاهش یافته است. این موضوع بیانگر آن است که بهترین نقطه‌ی عملکردی موتورهای گازسوز در بارهای حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد رخ می‌دهد.



شکل (۱۰-۴): شاخص‌های فنی موتور گازسوز برحسب بار جزئی

شکل (۴-۱۱) نمودار راندمان انرژی سیستم تولید همزمان دوگانه‌ی CHP را برای سناریوی مطرح شده نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود کمترین میزان راندمان CHP مربوط به توربین گاز بوده و محرک‌های اولیه‌ی موتور گازسوز و توربین بخار تقریباً راندمان برابری در سیستم تولید همزمان CHP خواهند داشت. دلیل کمتر بودن راندمان توربین گاز این است که منابع استحصال حرارتی کمتر بوده و تنها از گازهای داغ خروجی از آگزوز توربین گاز می‌توان حرارت دریافت نمود. به دلیل اینکه دمای گازهای خروجی را نیز نمی‌توان بیش از حد پایین آورد به ناچار بخشی از حرارت از دست می‌رود و راندمان انرژی کاهش می‌یابد. در حالت هیبریدی در دو حالتی که سیستم تولید همزمان با توربین گاز ترکیب شده است راندمان کلی در حالت CHP کاهش یافته است که دلیل آن نیز بیان گردید. در ترکیب با توربین گاز در واقع بخشی از بالانس انرژی از طریق گازهای داغ خروجی از توربین از دسترس خارج می‌گردد. این در حالی است که ترکیب دو محرک اولیه‌ی موتور گازسوز و توربین بخار باعث افزایش راندمان سیستم CHP شده است و از حالتی که از هر کدام از مولد ها به تنهایی استفاده شود نیز بیشتر خواهد بود و تا حدود ۸۱ درصد خواهد رسید. استفاده از حرارت خروجی موتور گازسوز به عنوان ورودی بویلر سبب افزایش دمای آبگرم ورودی بویلر می‌گردد و اختلاف دمای آب اولیه و نهایی کمتر شده و راندمان بویلر افزایش می‌یابد. افزایش راندمان بویلر سبب افزایش راندمان توربین بخار و در نتیجه افزایش راندمان کلی سیستم تولید همزمان می‌گردد.

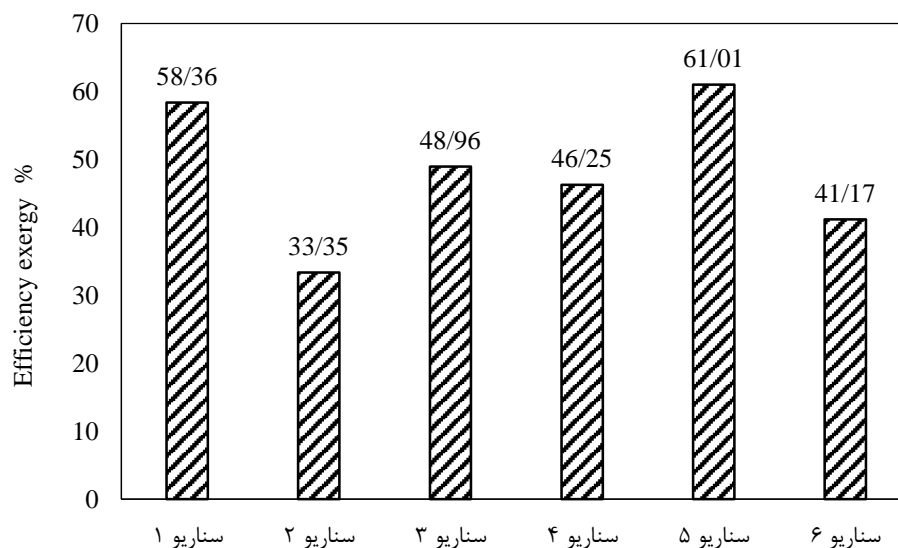


شکل (۴-۱۱): نمودار مقایسه راندمان انرژی

علاوه بر مباحث آنالیز انرژی و آنالیز اقتصادی، عامل مهم دیگری که در تحقیقات اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته، آنالیز انرژی است. با توجه به اهمیت این موضوع قبل از پرداختن به آنالیز اقتصادی در این بخش آنالیز انرژی محرک‌های اولیه مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۴-۳ نتایج آنالیز انرژی

همان‌طور که در بخش‌های گذشته بیان گردید انرژی به عنوان حداکثر کار مفید قابل استحصال تعریف می‌گردد. زمانی حداکثر کار به دست می‌آید که فرایند بازگشت‌پذیر باشد؛ بنابراین تحلیل انرژی دید روشنی به محققین می‌دهد تا فرایندها را به سمت بازگشت‌پذیری و دریافت کار بیشتر سوق دهند. شکل (۴-۱۲) راندمان انرژی سیستم تولید همزمان را بر اساس ۶ سناریوی معرفی شده نشان می‌دهد. افزایش انرژی در واقع افزایش قابلیت استحصال کار و حرارت از سیستم می‌باشد. سناریو ۵ که ترکیب موتور گازسوز و توربین بخار است بیشترین قابلیت تولید کار و حرارت را دارد چرا که با دریافت حرارت از سه منبع حرارتی بیان شده‌ی موتور گازسوز آن را جهت تولید توان و بخار به بویلر و توربین بخار منتقل می‌کند. در توربین بخار نیز به دلیل اینکه از بخار جهت تولید توان و فرایندها استفاده می‌شود راندمان انرژی افزایش می‌یابد. این امر به دلیل اختلاف سیال سیستم با شرایط مرده‌ی محیط بوده که مبنای انرژی است.



شکل (۴-۱۲): نمودار مقایسه راندمان انرژی

۴-۴-۴ نتایج آنالیز اقتصادی

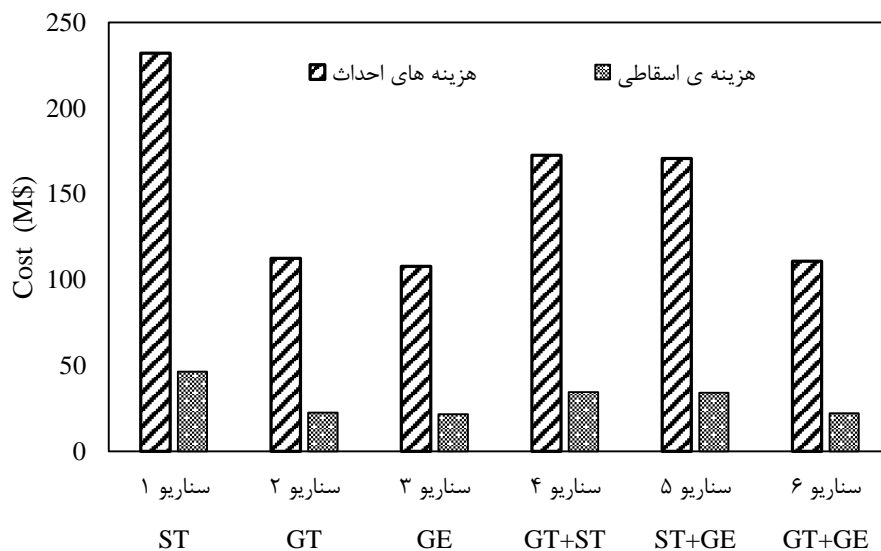
یکی از مهم‌ترین آنالیزهایی که در یک سیستم جایگزین مد نظر قرار می‌گیرد آنالیز اقتصادی است که در این بخش نتایج آنالیز اقتصادی آورده شده است.

اولین گام اجرای یک سیستم برآورد هزینه‌های احداث و سرمایه‌گذاری است. چنانچه احداث یک سیستم نوین نیازمند هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه‌ی بالایی باشد منابع موجود جهت اجرای آن محدود می‌گردد. هر چند این پارامتر به تنهای مبنای تحلیل خوب یا بد بودن سیستم نیست. از این رو این پارامتر را در کنار پارامترهای هزینه‌های تعمیر و نگهداری و هزینه‌های عملکردی سنجیده می‌شود که به ترتیب در شکل‌های (۴-۱۳) تا (۴-۱۵) آورده شده است.

شکل (۴-۱۳) هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ارزش اسقاطی سیستم تولید همزمان را بر اساس سناریوهای بیان شده نشان می‌دهد. ارزش اسقاطی به دلیل اینکه در پایان عمر سیستم است و مقدار آن مشخص نیست همانطور که بیان گردید به عنوان ضریبی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه تخمین می‌زنند.

همانطور که مشاهده می‌شود احداث سیستم تولید همزمان با محرک توربین بخار بیشترین هزینه‌ی احداث را به خود اختصاص می‌دهد. سادگی استفاده و نصب سیستم‌های تولید همزمان با موتور گازسوز و توربین گاز باعث کاهش هزینه‌های احداث می‌گردد. زیرا تجهیزات جانبی و عایق بندی کمتری نیاز است و باعث می‌شود هزینه‌ی خرید و راه اندازی به شدت کاهش یابد.

هزینه‌ی اسقاطی به عنوان ضریب ۲۰ درصدی از هزینه‌های احداث در نظر گرفته شده است که تغییرات آن وابسته به هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌باشد. از این رو سناریو‌هایی که فاقد توربین بخار هستند از هزینه‌های احداث و اسقاطی کمتری برخوردار هستند.



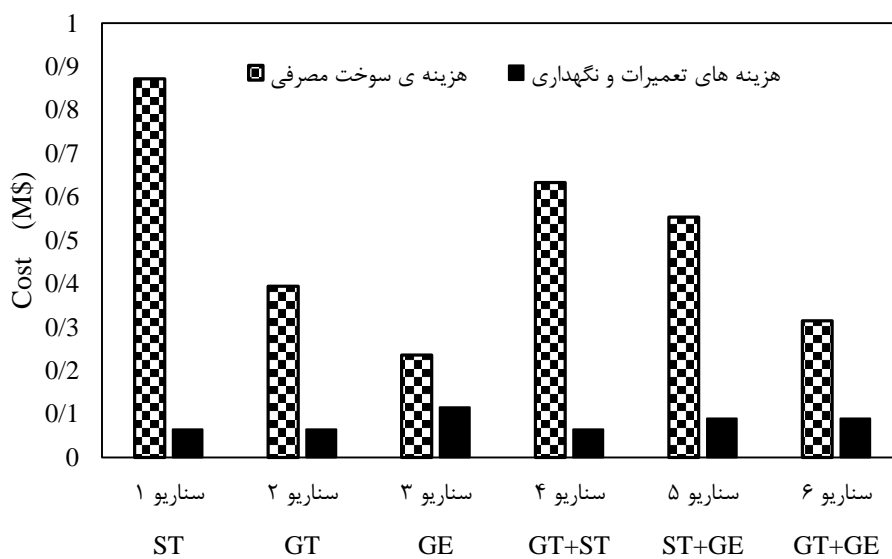
شکل (۴-۱۳): نمودار هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و ارزش اسقاطی سیستم تولید همزمان

شکل (۴-۱۴) نیز هزینه‌های مصرف سوخت و تعمیرات و نگهداری را برای سیستم تولید همزمان و بر اساس سناریوهای بیان شده نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از توربین بخار به عنوان محرک اولیه بیشترین هزینه‌ی سوخت مصرفی را دارا می‌باشد چرا که بویلر می‌بایست سوخت بیشتری مصرف نماید تا بخار مورد نیاز توربین جهت تولید توان و بخار مورد نیاز جهت تولید محصولات را تولید نماید. استفاده از محرک‌های موتور گازسوز و توربین گاز باعث می‌شود سوخت به صورت مستقیم در محرک مصرف شده و تولید توان نماید. حرارت خروجی استحصال شده از محرک اولیه نیز جهت پیش گرمایش و تولید بخار در بویلر

مجدداً استفاده می‌شود و باعث می‌گردد بویلر سوخت کمتری مصرف نماید. از این رو استفاده از دو محرک موتور گازسوز و توربین گاز سبب بهبود مصرف سوخت می‌گردد و در حالتی ترکیبی نیز سبب متعادل شدن مجموع سوخت مصرفی می‌گردد. به همین دلیل سناریو های ۴ و ۵ مصرف سوخت کمتری نسبت به سناریوی ۱ داشته‌اند.

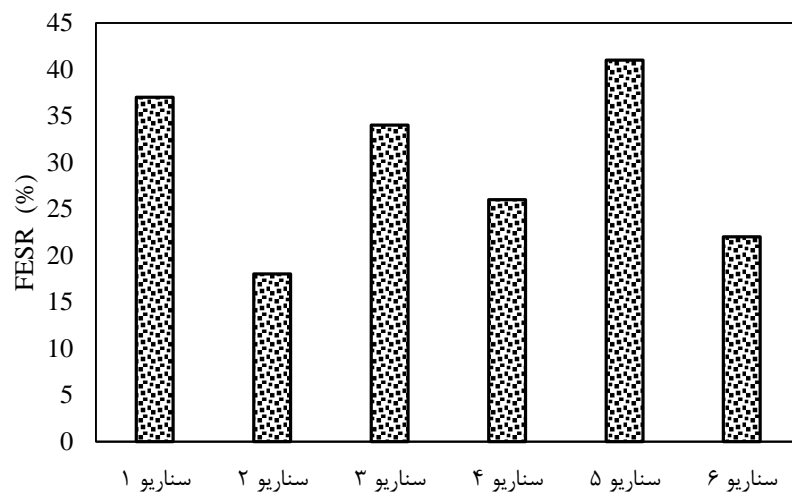
در ادامه‌ی بررسی هزینه‌های تعمیر و نگهداری محرک‌های اولیه مشاهده می‌شود موتور گازسوز نسبت به توربین بخار و گاز هزینه‌ی تعمیر و نگهداری بیشتری دارد. چرا که به ازای ساعت کارکرد موتور می‌بایست تعویض روغن و فیلتر موتور انجام گردد. پس از گذشت ساعت کاری مشخص نیز موتور گازسوز، توربین گاز و توربین بخار نیازمند تعمیرات اساسی و اورهال می‌باشند. مجموع این هزینه‌ها در نمودار هزینه‌های تعمیرات و نگهداری در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۵): نمودار هزینه‌های مصرف سوخت و تعمیرات و نگهداری سیستم تولید همزمان

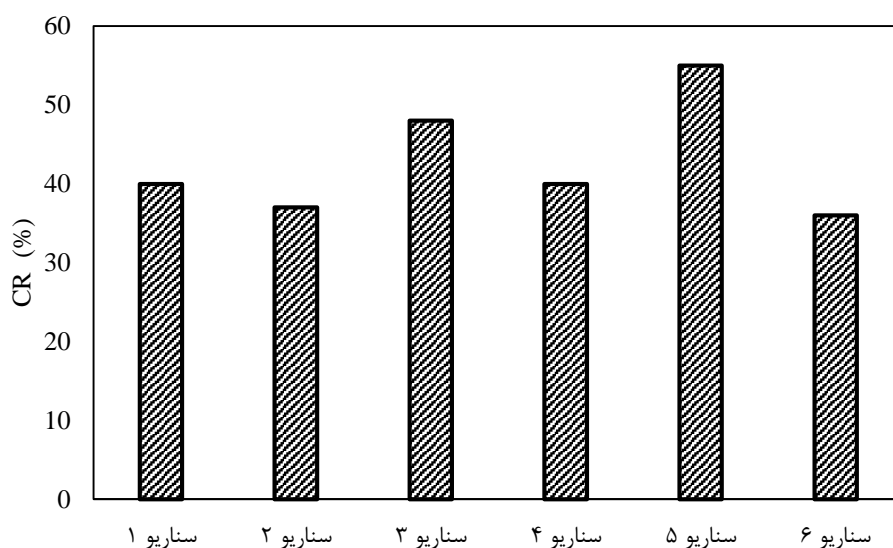
شکل (۴-۱۶) نمودار درصد کاهش مصرف سوخت اولیه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ترکیب موتور گازسوز و توربین بخار بیشترین میزان صرفه‌جویی مصرف سوخت را نشان می‌دهد. دلیل این امر آن است که موتورهای گازسوز دارای راندمان بالاتری در تولید توان برابر است. این مورد باعث می‌شود مصرف سوخت کاهش یابد. علاوه بر این از حرارت اتلافی موتور گازسوز گرمای بیشتری قابل

استحصال است. این حرارت ناشی از دریافت حرارت از آگروز، ژاکت خنک کننده و روغن روانکار می‌باشد که باعث می‌شود این حرارت اتلافی در بخش تولید بخار استفاده نمود و سوخت کمتری مصرف نمود. توربین گاز نیز به دلیل اینکه دارای راندمان پایینی در بخش تولید توان است و تنها منبع حرارت قابل استحصال آگروز توربین گاز می‌باشد، کمترین میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت را به خود اختصاص داده است. در حالت ترکیب توربین گاز با محرک‌های توربین بخار و موتور گازسوز میزان صرفه‌جویی مصرف سوخت کم خواهد شد.



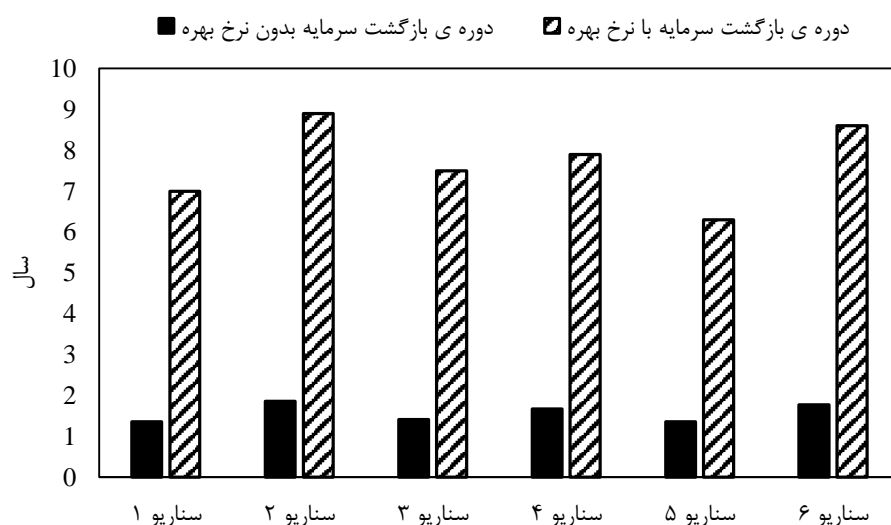
شکل (۴-۱۶): نمودار تغییرات کاهش مصرف سوخت (FESR) برای سناریوهای معرفی شده

شکل (۴-۱۷) درصد کاهش هزینه‌های عملکردی سیستم تولید همزمان پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که بیان گردید هزینه‌های عملکردی شامل خرید و فروش برق و سوخت می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که سناریو ۵ که ترکیبی از موتور گازسوز و توربین بخار می‌باشد بیشترین صرفه‌جویی در هزینه‌های عملکردی را به خود اختصاص می‌دهد؛ چرا که با کمترین میزان مصرف سوخت بیشترین میزان تولید توان و حرارت را خواهد داشت. همان‌طور که گفته شد میزان تولید توان و حرارت در میزان سوخت برابر برای توربین گاز از سایر محرک‌های اولیه کمتر است و به همین دلیل کاهش هزینه‌های عملکردی نیز برای سناریوهای دارای توربین گاز از سایر سناریوها کمتر می‌باشد. تطابق شکل (۴-۱۶) و (۴-۱۷) این مورد را تأیید می‌نماید.



شکل (۴-۱۷): نمودار تغییرات کاهش هزینه‌های عملکردی برای سناریوهای معرفی شده

شکل (۴-۱۸) دوره‌ی بازگشت سرمایه را برای سیستم تولید همزمان پیشنهادی و بر اساس ۶ سناریوی معرفی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سناریو ۵ کمترین دوره‌ی بازگشت سرمایه را به خود اختصاص داده است. با توجه به تحلیل‌های انجام شده در مورد راندمان، میزان مصرف سوخت و کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های عملکردی دوره‌ی بازگشت سرمایه نیز توجیه می‌گردد. سناریو ۲ نیز مطابق با میزان مصرف سوخت و هزینه‌های عملکردی بیشترین دوره‌ی بازگشت سرمایه را دارد که در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۸): نمودار کاهش دوره‌ی بازگشت سرمایه برای سناریوهای معرفی شده

با توجه به اینکه بیشترین راندمان انرژی و آگزرژی و کمترین میزان مصرف سوخت و بیشترین کاهش هزینه‌های عملکردی و حداقل دوره‌ی بازگشت سرمایه که همگی نکات مثبت یک سیستم تولید همزمان می‌باشد به سناریو ۵ اختصاص یافته است، این سناریو به عنوان بهترین سناریو انتخاب می‌گردد.

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

سیستم‌های تولید همزمان دارای مزایای عمده اقتصادی و زیست‌محیطی هستند؛ به همین دلیل استفاده از این سیستم‌ها در راستای تأمین برق، گرمایش و سرمایش مجموعه‌های تجاری، اداری و مسکونی در سال‌های اخیر به شدت افزایش یافته است. در پژوهش پیش رو، عملکرد سیستم تولید همزمان دوگانه با محرک‌های اولیه‌ی موتور گازسوز، توربین گاز و توربین بخار برای مجموعه‌ی تجاری کارخانه قند و شکر شاهرود تحت ۶ سناریو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل بهبود جایگزینی سیستم‌های هیبریدی را نشان داد که در ادامه به صورت جمع‌بندی شده آورده شده است.

۵-۲ جمع‌بندی نتایج

در تحقیق حاضر، مطلوبیت استفاده از سیستم تولید همزمان با محرک‌های اولیه‌ی موتور گازسوز، توربین گاز و توربین بخار و در حالت ترکیبی تحت ۶ سناریوی متفاوت بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد استفاده از سیستم‌های تولید همزمان در حالت هیبریدی دارای مزایای قابل توجهی نسبت به سیستم‌های تولید همزمان رایج با یک محرک اولیه و همچنین سیستم‌های تولید مجزا می‌باشد. همانطور که نتایج نشان داد ترکیب موتور گازسوز با توربین بخار برای کاربری کارخانه قند و شکر شاهرود بهترین ترکیبی پیشنهادی است. در این حالت راندمان سیستم تولید همزمان به ۸۰/۵۵ خواهد رسید که تا حدود ۲ درصد به راندمان سیستم تولید همزمان با یک محرک افزوده شده است. همچنین راندمان انرژی بین ۳ تا ۱۲ درصد نسبت به محرک توربین بخار و موتور گازسوز به تنهایی افزوده شده است و درصد کاهش مصرف سوخت به ۴۱ درصد رسیده است. در مقایسه‌ی اقتصادی نیز درصد کاهش هزینه‌های عملکردی برابر ۵۵ درصد محاسبه شده است. دوره‌ی بازگشت سرمایه با در نظر گرفتن نرخ بهره برابر ۶/۳ سال و بدون در نظر گرفتن نرخ بهره دوره‌ی بازگشت سرمایه برابر ۱/۳۶ سال خواهد بود.

۳-۵ پیشنهادها

در این پژوهش مطلوبیت استفاده از سیستم‌های تولید همزمان توان و گرمایش بر اساس مولد توربین بخار و در حالت‌های هیبریدی برای کاربری کارخانه قند و شکر شاهرود مورد بررسی قرار گرفت.

پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، توان تولیدی و عملکرد در بار جزئی، فشار بویلر و کندانسور و دما و دبی بخار در توربین بخار بود. نتایج بهبود عملکرد سیستم هیبریدی موتور گاز سوز به همراه توربین بخار را نسبت به سیستم‌های مرسوم تولید مجزا و همچنین سیستم‌های تولید همزمان با یک محرک را نشان داد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی موارد زیر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

- سایر پارامترهایی که در حالت هیبریدی موتور گاز سوز و توربین گاز موثر است مانند ترکیب بار بر روی تعداد بیشتری محرک اولیه‌ی موتور گازسوز مورد بررسی قرار گیرد.
- تعداد طبقات توربین بخار و استفاده از چندین توربین در حالت توربین بخار فشار بالا، فشار متوسط و فشار پایین نیز مورد بررسی قرار گیرد.
- در حالت سیستم تولید همزمان با ثابت بودن پارامترهای محرک‌های اولیه، پارامترهای سیستم بازیاب و سایر تجهیزات سیستم تولید همزمان مورد بررسی قرار گیرد.
- همچنین در پژوهش‌های بعدی ترکیب توربین بخار با موتور گازسوز و توربین گاز با انواع محرک‌های اولیه‌ی دیگر مانند میکرو توربین‌ها، موتورهای استرلینگ، سیکل ORC و ... مورد بررسی قرار گیرد.
- میزان حرارت خروجی از محرک‌های اولیه در حالت هیبریدی برای استفاده در فرایندهای دیگر مانند فرایندهای خشک کردن مواد و فرایندهای شیرین سازی و ... مورد بررسی قرار گیرد.

- [1] Chontanawat, J., L.C. Hunt, and R. Pierse, *Does energy consumption cause economic growth?: Evidence from a systematic study of over 100 countries*. Journal of policy modeling, 2008. 30(2): p. 209-220.
- [2] Fröling, M., *Energy use, population and growth, 1970-2000*. Journal of Population Economics, 2011. 24(3): p. 1133-1163.
- [3] Wilson, C., et al., *Future capacity growth of energy technologies: are scenarios consistent with historical evidence?* Climatic Change, 2013. 118(2): p. 381-395.
- [4] <http://vista.ir/article>.
- [5] Ahmadi, P. and I. Dincer, *Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant*. Applied Thermal Engineering, 2011. 31(14-15): p. 2529-2540.
- [6] Vujić, J., D.P. Antić, and Z. Vukmirović, *Environmental impact and cost analysis of coal versus nuclear power: the US case*. Energy, 2012. 45(1): p. 31-42.
- [7] Al-Sulaiman, F.A., F. Hamdullahpur, and I. 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, 2011. 31(4): p. 439-446.
- [8] Chen, Q., et al., *The exergy and energy level analysis of a combined cooling, heating and power system driven by a small scale gas turbine at off design condition*. Applied Thermal Engineering, 2014. 66(1): p. 590-602.

- [9] Deng, J., R. Wang, and G. Han, *A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems*. Progress in Energy and Combustion Science, 2011. 37(2): p. 172-203.
- [10] Puig-Arnavat, M., J.C. Bruno, and A. Coronas, *Modeling of trigeneration configurations based on biomass gasification and comparison of performance*. Applied Energy, 2014. 114: p. 845-856.
- [11] Gu, W., et al., *Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014. 54: p. 26-37.
- [12] Sanaye, S., M.M. Ghafurian, and F.T. Dastjerd, *Applying Relative Net Present or Relative Net Future Worth Benefit and exergy efficiency for optimum selection of a natural gas engine based CCHP system for a hotel building*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016. 34: p. 305-317.
- [13] Maerefat, M. and P. Shafie, *Design of CCHP system for office buildings in Tehran and thermodynamical, environmental and economical evaluation in comparison to conventional system*. Modares Mechanical Engineering, 2014. 14(6): p. 124-134.
- [14] Jradi, M. and S. Riffat, *Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. 32: p. 396-415.
- [۱۵] نیرو، و. راهنمای جامع تولید هم‌زمان برق و حرارت. دفتر بهبود بهره‌وری و اقتصاد برق و انرژی ۱۳۸۸.
- [16] Martinez, S., et al., *Micro-combined heat and power systems (micro-CHP) based on renewable energy sources*. Energy Conversion and Management, 2017. 154: p. 262-285.

- [17] Ebrahimi, M. and A. Keshavarz, *Climate impact on the prime mover size and design of a CCHP system for the residential building*. Energy and Buildings, 2012. 54: p. 283-289.
- [18] Aoun, B., *Micro combined heat and power operating on renewable energy for residential building*. 2008, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [۱۹] سراپچی، و همکاران، تحلیل ترمودینامیکی چرخه ترکیبی تولید سه گانه با محرک موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن (HCCI). مهندسی مکانیک مدرس، ۲۰۱۳. ۱۳(۲): p. 56-69.
- [20] <http://www.eecm.ir>.
- [۲۱] <http://www.GENCO.com> بررسی فنی نیروگاه‌های CCHP 1389.
- [22] TAVAKOLI, D.F., M.M. GHAFUORYAN, and S. FARAHAT, *COMPARISON OF SELECTION EFFECT ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION AND MULTICRITERIA OPTIMIZATIONS; ENERGY, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL IN PERFORMANCE OF CCHP SYSTEM*. 2015.
- [۲۳] معرفت، شفیعی، پیام، ارزیابی چندمعیاره سیستم CCHP تحت استراتژی‌های عملکرد مختلف برای یک ساختمان اداری در تهران با تکنیک AHP. مهندسی مکانیک مدرس، ۲۰۱۴. ۱۴(۸): ص ۳۷-۴۸.
- [۲۴] توکلی دستجرد، ف. م. م. غفوریان، س. ا. شکیب، بهینه سازی فنی اقتصادی سیستم تولید همزمان CCHP با تکیه بر نقش ارزش زمانی پول در دوره‌ی بازگشت سرمایه. مهندسی مکانیک مدرس، ۲۰۱۵. ۱۵(۵): ص ۲۵۴-۲۶۰.
- [25] (DOE), U.S.D.o.E., *U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Combined heat and power partnership*. 2008.
- [26] (SEAI), S.E.A.o.I., *New Technologies for CHP Applications*. 2006.

- [27] SYCOM ,O., „*Review of Combined Heat and Power Technologies*”. Office of Industrial Technologies, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy, 1999.
- [28] Wu, D. and R. Wang, *Combined cooling, heating and power: a review*. progress in energy and combustion science, 2006. 32(5): p. 459-495.
- [29] Ahmadi, P. and I. Dincer, *Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit*. Energy Conversion and Management, 20 :۱۱ (۵)۵۲ : p. 2296-2308.
- [30] Barros, J.J.C., et al., *Probabilistic life-cycle cost analysis for renewable and non-renewable power plants*. Energy, 2016. 112: p. 774-787.
- [31] Hentschel, J. and H. Spliethoff, *A parametric approach for the valuation of power plant flexibility options*. Energy Reports, 2016. 2: p. 40-47.
- [32] Aljundi, I.H., *Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan*. Applied thermal engineering, 2009. 29(2-3): p. 324-328.
- [33] Park, K., D. Shin, and E.S. Yoon, *The cost of energy analysis and energy planning for emerging, fossil fuel power plants based on the climate change scenarios*. Energy, 2011. 36(5): p. 3606-3612.

[۳۴] آزادانی، ن. ا. دانش، تحلیل انرژی و انرژی نیروگاه بخار پالایشگاه اصفهان. نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، ۲۰۱۲. ۲(۲): p. 28-39.

- [35] Ahmadi, G., D. Toghraie, and O. Akbari, *Energy, exergy and environmental (3E) analysis of the existing CHP system in a petrochemical plant*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. 99: p. 234-242.

- [36] Abdella, M.M. and I.A. Nassar, *Parameters calculation of thermal power plant dynamic model using steam cycle data*. Thermal Science and Engineering Progress, 2019. 9: p. 259-265.
- [37] Gonca, G. and I. Genc, *Thermoecology-based performance simulation of a Gas-Mercury-Steam power generation system (GMSPGS)*. Energy Conversion and Management, 2019. 189: p. 91-104.
- [38] Alfaro-Ayala, J., et al., *Use of bioethanol in a gas turbine combustor*. Applied Thermal Engineering, 2013. 61(2): p. 481-490.
- [39] Cavarzere, A., et al., *Experimental analysis of a micro gas turbine fuelled with vegetable oils from energy crops*. Energy Procedia, 2014. 45: p. 91-100.
- [40] Yucer, C.T., *Thermodynamic analysis of the part load performance for a small scale gas turbine jet engine by using exergy analysis method*. Energy, 2016. 111: p. 251-259.
- [41] Kim, T. and S. Hwang, *Part load performance analysis of recuperated gas turbines considering engine configuration and operation strategy*. Energy, 2006. 31(2): p. 260-277.
- [42] Sun, Z.-G., *Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine*. Energy and Buildings, 2008. 40(2): p. 126-130.
- [43] Liu, M., Y. Shi, and F. Fang, *Combined cooling, heating and power systems: A survey*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. 35: p. 22-1 .
- [44] Teng, X., et al., *A simple method to determine the optimal gas turbine capacity and operating strategy in building cooling, heating and power system*. Energy and Buildings, 2014. 80: p. 623-630.

- [45] Carapellucci, R. and L. Giordano, *Energy, economic and environmental assessments for gas-turbine integration into an existing coal-fired power plant*. Energy Procedia, 2014. 45: p. 1175-1184.
- [46] Tookanlou, M., M. Ardehali, and M. Nazari, *Combined cooling, heating, and power system optimal pricing for electricity and natural gas using particle swarm optimization based on bi-level programming approach: Case study of Canadian energy sector*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015. 23: p. 417-430.
- [47] Colonna, P. and S. Gabrielli, *Industrial trigeneration using ammonia–water absorption refrigeration systems (AAR)*. Applied Thermal Engineering, 2003. 23(4): p. 381-396.
- [48] Javan, S., et al., *Fluid selection optimization of a combined cooling, heating and power (CCHP) system for residential applications*. Applied Thermal Engineering, 2016. 96: p. 26-38.
- [49] Kang, J.Y., T.S. Kim, and K.B. Hur, *Comparative economic analysis of gas turbine-based power generation and combined heat and power systems using biogas fuel*. Energy, 2014. 67: p. 309-318.
- [50] Roman, K.K. and J.B. Alvey, *Selection of prime mover for combined cooling, heating, and power systems based on energy savings, life cycle analysis and environmental consideration*. Energy and Buildings, 2016. 110: p. 170-181.
- [51] chahartaghi, m. and M .Sheykhi, *Modeling of combined heating and power system driven by Stirling engine from the perspective of the fuel consumption and pollution emission*. Modares Mechanical Engineering, 2017. 17(10): p. 301-311.

- [52] Chahartaghi, M. and B.A. Kharkeshi, *Performance analysis of a combined cooling, heating and power system with PEM fuel cell as a prime mover*. Applied Thermal Engineering, 2018. 128: p. 805-817.
- [53] Somehsaraei, H.N., et al., *Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine using a validated thermodynamic model*. Applied Thermal Engineering, 2014. 66(1): p. 181-190.
- [54] Li, H., et al., *Energy utilization evaluation of CCHP systems*. Energy and buildings, 2006. 38(3): p. 253-257.
- [55] Abbasi, M., M. Chahartaghi, and S.M. 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, 2018. 173: p. 359-374.
- [56] Quero, M., et al., *Solugas—Operation experience of the first solar hybrid gas turbine system at MW scale*. Energy Procedia, 2014. 49: p. 1820-1830.
- [57] Sarkis, R.B. and V. Zare, *Proposal and analysis of two novel integrated configurations for hybrid solar-biomass power generation systems: thermodynamic and economic evaluation*. Energy Conversion and Management, 2018. 160: p. 411-425.
- [58] Ansarinasab, H. and M. Mehrpooya, *Investigation of a combined molten carbonate fuel cell, gas turbine and Stirling engine combined cooling heating and power (CCHP) process by exergy cost sensitivity analysis*. Energy Conversion and Management, 2018. 165: p. 291-303.
- [59] Wang, X., et al., *Multi-objective optimization of a gas turbine-based CCHP combined with solar and compressed air energy storage system*. Energy Conversion and Management, 2018. 16 :p. 93-101.

- [60] Zhang, X., et al., *Analysis of a feasible trigeneration system taking solar energy and biomass as co-feeds*. Energy conversion and management, 2016. 122: p. 74-84.
- [61] Wang, Z., et al., *Proposal and assessment of a new CCHP system integrating gas turbine and heat-driven cooling/power cogeneration*. Energy Conversion and Management, 2017. 144: p. 1-9.
- [62] Gao, P., et al., *Energy matching and optimization analysis of waste to energy CCHP (combined cooling, heating and power) system with exergy and energy level*. Energy, 2015. 79: p. 522-535.
- [63] Kang, L., et al., *Energy, economical, environmental evaluation of a CCHP-GSHP system based on carbon tax and electric feed in tariff*. Energy Procedia, 2016. 88: p. 510-517.
- [64] Mohammadi, A., et al., *Thermodynamic analysis of a combined gas turbine, ORC cycle and absorption refrigeration for a CCHP system*. Applied Thermal Engineering, 2017. 111: p. 397-406.
- [65] Wee, J.-H., *Molten carbonate fuel cell and gas turbine hybrid systems as distributed energy resources*. Applied energy, 2011. 88(12): p. 4252-4263.
- [66] Korlu, M., J. Pirkandi, and A. Maroufi, *Thermodynamic analysis of a gas turbine cycle equipped with a non-ideal adiabatic model for a double acting Stirling engine*. Energy Conversion and Management, 2017. 147: p. 120-134.
- [67] Rao, P.M., *Energy conservation and alternative sources of energy in sugar factories and distilleries*. 2001: ISPCCK Publishers & Distributors.
- [68] Taner, T., *Food industry energy efficiency and energy management: the case of sugar factory [dissertation] Gazi University*. 2013, Ankara.

- [69] Taner, T. and M. Sivrioglu, *Thermoeconomic analysis for the power plants of sugar factories*. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2014. 29(2): p. 407-414.
- [70] Ganjehkaviri, A., et al., *Modelling and optimization of combined cycle power plant based on exergoeconomic and environmental analyses*. Applied Thermal Engineering, 2014. 67(1-2): p. 566-578.
- [71] Figueroa, I. and M. Arriola, *Energy analysis of the sugar production process using modern techniques of process integration*. Zuckerindustrie, 2001. 126(9): p. 707-713.
- [72] Urbaniec, K., P. Zalewski, and X. Zhu, *A decomposition approach for retrofit design of energy systems in the sugar industry*. Applied thermal engineering, 2000. 20(15-16): p. 1431-1442.
- [73] Jiang-Jiang, W., Z. Chun-Fa, and J. You-Yin, *Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in China*. Applied Energy, 2010. 87(4): p. 1247-1259.
- [74] Mago ,P.J. and A.K. Hueffed, *Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies*. Energy and Buildings, 2010. 42(10): p. 1628-1636.
- [75] Wang, L., et al., *Energy, environmental and economic evaluation of the CCHP systems for a remote island in south of China*. Applied Energy, 2016. 183: p. 874-883.
- [76] Xu, D. and M. Qu, *Energy, environmental, and economic evaluation of a CCHP system for a data center based on operational data*. Energy and Buildings, 2013. 67 :p. 176-186.

- [77] Li, L., et al., *Optimization and analysis of CCHP system based on energy loads coupling of residential and office buildings*. Applied Energy, 2014. 136: p. 206-216.
- [78] Sanaye, S. and M.M. Ghafurian, *Applying relative equivalent uniform annual benefit for optimum selection of a gas engine combined cooling, heating and power system for residential buildings*. Energy and Buildings, 2016. 128: p. 809-818.
- [۷۹] توکلی دستجرد, ف., ارزیابی نحوه‌ی انتخاب ظرفیت موتورگازسوز در بهینه‌سازی سیستم CCHP با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطالعه موردی: مجتمع ورزشی آبی. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر, ۲۰۱۶. ۴۸(۱): ص ۷۹-۹۲.
- [80] Darrow, K., et al., *Catolog of CHP Technologies-US Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership*. no. March, 2۰۱۵
- [81] Sanaye, S., M.A. Meybodi, and S. Shokrollahi, *Selecting the prime movers and nominal powers in combined heat and power systems*. Applied thermal engineering, 2008. 28(10): p. 1177-1188.
- [82] Ebrahimi, M., *The environ-thermo-economical potentials of operating gas turbines in industry for combined cooling, heating, power and process (CCHPP)*. Journal of cleaner production, 2017. 142: p. 4258-4269.
- [83] Ahmadi, P. and I. Dincer, *Exergoenvironmental analysis and optimization of a cogeneration plant system using Multimodal Genetic Algorithm (MGA)*. Energy, 2010. 35(12): p. 5161-5172.
- [84] Caresana, F., et al., *Microturbogas cogeneration systems for distributed generation: Effects of ambient temperature on global performance and components' behavior*. Applied Energy, 2014. 124: p. 17-27.

- [85] Santo, D.E., *Energy and exergy efficiency of a building internal combustion engine trigeneration system under two different operational strategies*. Energy and Buildings, 2012. 53: p. 28-38.
- [86] Gungor, A., et al., *Splitting the exergy destruction into avoidable and unavoidable parts of a gas engine heat pump (GEHP) for food drying processes based on experimental values*. Energy conversion and management, 2013. 73: p. 309-316.
- [87] Khaliq, A. and I. Dincer, *Energetic and exergetic performance analyses of a combined heat and power plant with absorption inlet cooling and evaporative aftercooling*. Energy, 2011. 36(5): p. 2662-2670.
- [88] Koch, C., F. Cziesla, and G. Tsatsaronis, *Optimization of combined cycle power plants using evolutionary algorithms*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2007. 46(11): p. 1151-1159.
- [89] Szargut, J., *Exergy method: technical and ecological applications*. Vol. 18. 2005: WIT press.
- [90] Ahmadi, P., I. Dincer, and M.A. Rosen, *Thermodynamic modeling and multi-objective evolutionary-based optimization of a new multigeneration energy system*. Energy Conversion and Management, 2013. 76: p. 282-300.
- [91] Kotas, T.J., *The exergy method of thermal plant analysis*. 2013: Elsevier.
- [92] Gu ,Q., et al., *Integrated assessment of combined cooling heating and power systems under different design and management options for residential buildings in Shanghai*. Energy and Buildings, 2012. 51: p. 143-152.
- [93] Sanaye, S. and H. Hajabdollahi, *4 E analysis and multi-objective optimization of CCHP using MOPSOA*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2014. 228(1): p. 43-60.

[۹۴] معرفت، شفیعی، پیام، طراحی سیستم *CCHP* برای ساختمان‌های اداری در تهران و ارزیابی ترمودینامیکی، زیست محیطی و اقتصادی آن نسبت به سیستم مرسوم. مهندسی مکانیک مدرس، ۲۰۱۴. ۱۴(۶): ص ۱۲۴-۱۳۴.

- [95] Ebrahimi, M. and A. Keshavarz, *Sizing the prime mover of a residential micro-combined cooling heating and power (CCHP) system by multi-criteria sizing method for different climates*. Energy, 2013. 54: p. 291-301.
- [96] Li, S., et al., *Full chain energy performance for a combined cooling, heating and power system running with methanol and solar energy*. Applied energy, 2013. 112: p.۶۸۱-۶۷۳ .
- [97] Kim, S., et al. *Development of the 5 MW power generation gas turbine engine*. in *ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2011. American Society of Mechanical Engineers.
- [98] Ebrahimi, M. and I. Moradpoor, *Combined solid oxide fuel cell, micro-gas turbine and organic Rankine cycle for power generation (SOFC–MGT–ORC)*. Energy Conversion and Management, 2016. 116: p. 120-133

Abstract

Sugar factories serve as one of the most important energy consumers in industrial societies. The amount of energy consumed in these production units is very important and should be optimized and targeted. Replacing more efficient systems such as cogeneration systems over traditional systems will increase energy efficiency, exergy efficiency, reduce fuel consumption and lower operating costs. Therefore, in this study, six scenarios for replacing cogeneration systems with traditional ones for Shahroud Sugar Factory were investigated. The results show that using hybrid cogeneration system improves energy and exergy efficiency and reduces operating costs and fuel consumption. Among the six scenarios presented, the combination of gas engine and steam turbine was selected as the best scenario. The results show that using this combination will achieve 80% energy efficiency and 61% exergy efficiency. It also reduces fuel consumption by 41% and operating costs by 55%. In this status, the payback with interest rate and interest rate will be 6 and 1.36 years, respectively.

Keywords:

Gas turbine, Steam turbine, Energy analysis, Exergy analysis, Economic analysis



Shahrood University of Technology

Department of Mechanical and Mechatronics Engineering

MS.c Thesis in Energy Systems Engineering

**Energy and exergy analysis of co-generation system in sugar
production process in shahrood sugar factory and testing the
feasibility of improving technical and economic conditions**

By: Rahmat Malek

Supervisors:

Dr. Seyed Majid Hashemian

Dr. Mahmood Chahartaghi

September 2019