



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



موسسه آموزش عالی انرژی

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی سیستم های انرژی - تکنولوژی انرژی

**عنوان**

**بهینه سازی تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش با استفاده از  
میکروتوربین گاز، مبدل حرارتی و چیلر جذبی در شرکت مهبان  
دارو**

**استاد راهنما:**

**جناب آقای دکتر مجتبی میرزایی**

**استاد مشاور:**

**جناب آقای دکتر رضا علائی**

**پژوهشگر:**

**مهناز رجبی**

**زمستان ۱۳۹۵**

## تقدیم نامہ

ماحصل آموختہ ہایم را تقدیم می کنم بہ آنان کہ مہر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

بہ استوارترین تکیہ گاہم، دستان پر مہر پدرم

بہ سبزترین نگاہ زندگیم، چشمان سبز مادرم

کہ ہرچہ آموختم در مکتب عشق شما آموختم و ہرچہ بلو شتم قطرہ ای از دریای بی کران مہربانیان را پاس نتوانم بگویم.

امروز، ہستی ام بہ امید شماست و فردا کلید باغ بہشت رضای شما. رہ آوردی کران سنگ ترا از این ارزان نداشتم تا بہ خاک پیتان نثار

کنم، باشد کہ حاصل تلاشم نسیم کونہ غبار محنتگیتان را بزوداید.

بوسہ بردستان پر مہرتان...

## پاسکزاری

پاس خداوند بزرگ را که به ما قدرت فکر کردن آموخت، بر خود لازم می‌دانم از استاد کرامت‌در جناب آقای دکتر محبتی میرزایی که در

طول نخواست پیمان به عنوان استاد راهنما با محبت و خوشرویی، راهنمایی‌های ارزنده‌ای کردند، قدردانی نمایم. همچنین از استاد فرزانه جناب

آقای دکتر رضا علایی که با سه صدر، فراتر از وظایف استاد مشاور در نخواست این پایان نامه یاری رسان من بودند، تشکر می‌کنم. از استاد

کرامت‌در جناب آقای دکتر یاسی که در طول تحصیل از راهنمایی‌هایشان استفاده کردم، پاسکزارم.

## چکیده:

بهینه سازی انرژی به عنوان یک راهکار اساسی برای کاهش مصرف انرژی و نیز کاهش آلاینده های زیست محیطی در کشورهای پیشرفته دنیا مطرح شده است. با توجه به افزایش مصرف انرژی در جهان، نیاز به استفاده از سیستم های با قابلیت در تامین برق و انرژی بیش از پیش احساس می گردد. امروزه این کشورها به بهینه سازی و مدیریت انرژی به عنوان یک منبع جدید می نگرند. در این میان یکی از مهمترین راهکارهای بهینه سازی انرژی انجام شده در تمامی این کشورها، استفاده از سیستم های تولید همزمان سرما، گرما و الکتریسیته<sup>1</sup> (CCHP) می باشد. فن آوریهای تولید همزمان برق و حرارت، برق یا توان مکانیکی تولید نموده و حرارت اضافی را برای مصارف مختلف از جمله گرمایش و سرمایش به صورت قابل ملاحظه ای بازیافت می نماید. از مهمترین مزایای سیستم های CCHP، کاهش تلفات شبکه انتقال و توزیع، کاهش مصرف انرژی، افزایش بازده کل سیستم و نیز کاهش آلاینده ها می باشد. این سیستم ها معمولاً شامل محرک اولیه، سیستم بازیافت حرارت، مبدلهای حرارتی، چیلر جذبی و تجهیزات کنترلی می باشند.

در این پژوهش سیستم تولید همزمان با استفاده از میکروتوربین گازی، مبدل حرارتی و چیلر جذبی در شرکت مهبان دارو مورد بررسی قرار گرفته است که برای تحلیل بهتر و دقیق تر نتایج، جهت مدلسازی سیستم مذکور از ماژول ترموفلکس نرم افزار تخصصی ترموفلو استفاده شده و پس از مدلسازی و بررسی سناریو های مختلف ترمال و الکتریکال، با در نظر گرفتن بار الکتریکی و حرارتی مورد نیاز ساختمان، به حالت بهینه این سیستم دست می یابیم. در این پژوهش سعی بر این بوده تا با مرور بر آثار گذشته و تحقیقات صورت گرفته، مدلسازی مجموعه تولید همزمان برق، حرارت و سرما در شرکت مهبان دارو، به نحو احسن انجام شود تا گامی مناسب در جهت بهبود سیستم تولید انرژی واحد مذکور صورت گیرد.

**کلمات کلیدی:** بهینه سازی، سیستم های تولید همزمان برق حرارت و سرما، مبدل حرارتی، چیلر جذبی

---

<sup>1</sup> Combined Cool, Heat and Power

## فهرست مطالب

چکیده	.....	أ
فهرست مطالب	.....	ب
فهرست شکل ها	.....	ث
فهرست جداول	.....	ج
فهرست علائم اختصاری	.....	ذ

### فصل (۱) مقدمه

مقدمه	.....	۱-۱
ضرورت تحقیق	.....	۲-۱
روشها	.....	۳-۱
اهداف	.....	۴-۱
جنبه های نوآوری	.....	۵-۱

### فصل (۲) کلیات

تولید برق و انرژی	.....	۱-۲
سیستم های پایه تولید همزمان	.....	۲-۲
کاربرد سیستم های تولید همزمان	.....	۱-۲-۲

۲۶	تجهیزات و اجزاء..... (۲-۲-۲)
۴۹	مسائل مربوط به طراحی فنی..... (۳-۲)
۵۱	ملاحظات زیست محیطی در سیستم های تولید همزمان..... (۴-۲)
	فصل ۳) مدلسازی سیستم
۵۲	توضیح مختصر در مورد شرکت داروسازی مهبان دارو..... (۱-۳)
۵۲	سیستم مدل شده و روابط حاکم بر آن..... (۲-۳)
	فصل ۴) شبیه سازی سیستم
۷۶	سناریوی اول.....
۸۲	سناریوی دوم.....
۸۶	سناریوی سوم.....
۸۹	سناریوی چهارم.....
۹۳	سناریوی پنجم.....
	فصل ۵) جمع بندی
۹۷	نتایج.....
۱۰۲	فهرست مراجع.....



## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲- شماتیک یک سیستم CCHP متداول..... ۱۷
- شکل ۲-۲- چرخه چیلر جذبی..... ۴۸
- شکل ۱-۳- جریان انرژی هوا در کمپرسور..... ۵۷
- شکل ۲-۳- جریان انرژی محفظه احتراق..... ۶۶
- شکل ۳-۳- جریان ورود و خروج انرژی از توربین..... ۶۸
- شکل ۱-۴- شماتیک سیستم CCHP مدل شده در نرم افزار ترموفلو..... ۷۴
- شکل ۱-۵- تغییرات راندمان الکتریکی نسبت به دمای محیط..... ۹۹

## فهرست جدول ها

- جدول (۱-۲) - مقایسه محرک های اولیه..... ۲۸
- جدول (۱-۴) - آنالیز سوخت ورودی به محفظه احتراق..... ۷۵
- جدول (۲-۴) - مشخصات سوخت ورودی به محفظه احتراق در سناریوی اول..... ۷۵
- جدول (۳-۴) - مشخصات سوخت ورودی به محفظه احتراق در سناریوهای دوم تا پنجم..... ۷۶
- جدول (۴-۴) - مشخصات هوای ورودی به کمپرسور..... ۷۶
- جدول (۵-۴) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین..... ۷۶
- جدول (۶-۴) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگزاست..... ۷۷
- جدول (۷-۴) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگزاست..... ۷۷
- جدول (۸-۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر قبل از چیلر..... ۷۷
- جدول (۹-۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر بعد از چیلر..... ۷۸
- جدول (۱۰-۴) - بازده خروجی سیستم..... ۷۸
- جدول (۱۱-۴) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل..... ۷۹
- جدول (۱۲-۴) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین..... ۷۹

جدول (۴-۱۳) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگراست.....	۷۹
جدول (۴-۱۴) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگراست.....	۷۹
جدول (۴-۱۵) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر.....	۸۰
جدول (۴-۱۶) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر بعد از چیلر.....	۸۰
جدول (۴-۱۷) - بازده خروجی سیستم.....	۸۱
جدول (۴-۱۸) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر.....	۸۱
جدول (۴-۱۹) - بازده خروجی سیستم.....	۸۲
جدول (۴-۲۰) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل.....	۸۳
جدول (۴-۲۱) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین.....	۸۳
جدول (۴-۲۲) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگراست.....	۸۳
جدول (۴-۲۳) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگراست.....	۸۳
جدول (۴-۲۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر.....	۸۴
جدول (۴-۲۵) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر بعد از چیلر.....	۸۴
جدول (۴-۲۶) - بازده خروجی سیستم.....	۸۴
جدول (۴-۲۷) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر.....	۸۵
جدول (۴-۲۸) - بازده خروجی سیستم.....	۸۵

- جدول (۴-۲۹) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل..... ۸۶
- جدول (۴-۳۰) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین..... ۸۶
- جدول (۴-۳۱) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگراست..... ۸۷
- جدول (۴-۳۲) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگراست..... ۸۷
- جدول (۴-۳۳) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر..... ۸۷
- جدول (۴-۳۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر بعد از چیلر..... ۸۸
- جدول (۴-۳۵) - بازده خروجی سیستم..... ۸۸
- جدول (۴-۳۶) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر..... ۸۹
- جدول (۴-۳۷) - بازده خروجی سیستم..... ۸۹
- جدول (۴-۳۸) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل..... ۹۰
- جدول (۴-۳۹) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین..... ۹۰
- جدول (۴-۴۰) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگراست..... ۹۰
- جدول (۴-۴۱) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگراست..... ۹۰
- جدول (۴-۴۲) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر..... ۹۱
- جدول (۴-۴۳) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر بعد از چیلر..... ۹۱
- جدول (۴-۴۴) - بازده خروجی سیستم..... ۹۱

- جدول (۴-۴۵) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر قبل از چیلر..... ۹۲
- جدول (۴-۴۶) - بازده خروجی سیستم..... ۹۲
- جدول (۴-۴۷) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل..... ۹۳
- جدول (۴-۴۸) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین..... ۹۳
- جدول (۴-۴۹) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگراست..... ۹۴
- جدول (۴-۵۰) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگراست..... ۹۴
- جدول (۴-۵۱) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر قبل از چیلر..... ۹۴
- جدول (۴-۵۲) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر بعد از چیلر..... ۹۵
- جدول (۴-۵۳) - بازده خروجی سیستم..... ۹۵
- جدول (۴-۵۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر قبل از چیلر..... ۹۶
- جدول (۴-۵۵) - بازده خروجی سیستم..... ۹۶
- جدول (۵-۱) - خلاصه داده های سناریوهای بررسی شده..... ۹۸
- جدول (۵-۲) - خلاصه هزینه های میکروتوربین و چیلر..... ۹۸

## فهرست علائم اختصاری

$CCHP$	تولید همزمان برق و حرارت و سرمایش		
$HHV$	ارزش حرارتی بالای سوخت		
$LHV$	ارزش حرارتی پایین سوخت		
$Q$	انرژی	$\dot{m}$	دبی جرمی
$T.out$	خروجی توربین	$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه
$T$	توربین	$r_p$	نسبت فشاری
$C$	کمپرسور	$k$	نسبت گرمای ویژه
$Air$	هوا	$\eta$	راندمان
$B$	بویلر	$x$	کسر مولی
$C.out$	خروجی کمپرسور	$W$	کار واقعی
$1.g$	ورودی بازیافت	$W'$	کار ایده آل
$C.in$	ورودی کمپرسور	$h$	آنتالپی واقعی
$2.g$	خروجی حرارت	$h'$	آنتالپی ایده آل
$Mix$	ترکیب هوا و سوخت	$T$	دمای واقعی
$T.in$	خروجی محفظه احتراق	$T'$	دمای ایده آل
$net$	خالص	$Heating$	گرمایش
$g$	خروجی بویلر	$Cooling$	سرمایش

## فصل اول مقدمه

## (۱-۱) مقدمه و تعریف مسأله

تقریباً تمام تاسیسات صنعتی و غیر صنعتی نیازمند انرژی های برق و حرارت می باشند. حرارت یا انرژی حرارتی معمولاً از سوخت خریداری شده از طریق انواع مختلفی از دستگاه های تبدیل انرژی تولید می شود. گرما برای بالا بردن دمای بخار، دمای آب گرم و یا هوای گرم برای گرم کردن فضا مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین با بهره گیری از چرخه هیت درایون<sup>۱</sup> می توان برای سرمایش محیط از آن سود برد(۱). برق نیز می تواند از صنایع تولید الکتریسیته و یا بخش خصوصی تولید آن خریداری گردد. الکتریسیته به عنوان برق برای روشنایی و کامپیوترها و راه اندازی تجهیزات از طریق موتورهای الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین به عنوان انرژی مکانیکی در قالب یک شفت دوار برای راه اندازی مستقیم تجهیزات به کار برده می شود(۲).

تولید پراکنده طبق تعریف عبارت است از تولید برق در محل مصرف یا در نزدیکی آن با استفاده از سیستم های تولید برق نسبتاً کوچک که ظرفیت آن ها معمولاً کمتر از ۲۵ مگاوات می باشد. سابقه استفاده از تولید پراکنده به درستی روشن نیست ولی آنچه مشخص است این است که بعد از دهه ۷۰ عوامل مختلفی دست به دست هم دادند و باعث بوجود آمدن مبحثی به نام تولید پراکنده شدند. تولید همزمان برق و گرما یا به اختصار تولید همزمان، یکی از مهمترین کاربردهای تولید پراکنده است(۳).

---

<sup>1</sup> Heat-driven



تولید همزمان برق و حرارت و برودت (CCHP) تولید ترکیبی برق با توان محوری و حرارت مفید، تسط یک سیستم، با استفاده از دو شکل مختلف انرژی مفید با به کارگیری یک منبع اولیه انرژی به شمار می‌آید که از تولید همزمان گرما و برق<sup>۱</sup> (CHP) مشتق شده است. تولید همزمان برق، حرارت و برودت یک تکنولوژی تولید همزمان است که یک چیلر جذبی در آن برای تولید سرما ادغام شده است (۴).

CCHP شامل یک توربین گاز، ژنراتور و چیلر جذبی به عنوان اجزای اصلی تشکیل دهنده سیستم می باشد. توربین انرژی گازهای داغ و فشرده را به قدرت محوری مبدل می سازد و انرژی مکانیکی تولید شده در ژنراتور تبدیل به الکتریسیته می گردد. در همین زمان نیز چیلر جذبی با استفاده از ژاکت آب و گازهای خروجی از توربین، سرما را برای فصل تابستان و مبدل حرارتی گرما را برای فصل زمستان تولید می کند (۵).

در صورتی که گرمای تلف شده توربین برای تولید گرما و سرمای مورد نیاز مجموعه ای که از CCHP استفاده می کنند کافی نباشد می توان گاز طبیعی را در محفظه احتراق چیلر جذبی به عنوان مکمل عملیات سوزاند تا نقصان انرژی برطرف گردد. در حالی که تولید حرارت به تنهایی در دیگ های بخار و سیستمهای قدرت اغلب تنها ۳۳٪ موثر (۶۷٪ از انرژی سوخت هدر رفته است) هستند. سیستم های CCHP می توانند ۶۰٪ تا ۸۰٪ از سوخت ورودی را به انرژی مفید تبدیل کنند (۶).

سیستم های تولید همزمان به عنوان یکی از موثرترین راهکارها جهت تأمین انرژی های مصرفی ساختمان در بخش تجاری و مسکونی مورد استفاده قرار می گیرند. ساختمان این

---

<sup>1</sup> Combined Heat and Power

سیستم ها ضمن برآورده کردن همزمان نیازهای انرژی، با توجه به راندمان انرژی بالا، موجب کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش مصرف سوخت های فسیلی شده و نتایج ارزنده ای از جمله صرفه جویی قابل ملاحظه ای در هزینه های انرژی مصرف کنندگان و نیز کاهش آلاینده های زیست محیطی به همراه خواهد داشت. در این میان نقش چیلرهای جذبی در سیستم تولید همزمان به عنوان تأمین کننده بارهای سرمایشی بسیار قابل توجه است (۷).

عموماً در سیستمهای تولید همزمان توان مکانیکی برای راندن یک ژنراتور برق مورد استفاده قرار گرفته و حرارت تولید شده مفید به شکل بخار، آب داغ و یا هوای داغ در فرآیندهای مختلف مانند خشک کردن، گرمایش و . . . به مصرف می رسد. البته این توان مکانیکی تولید شده علاوه بر تولید انرژی الکتریکی در فنها، پمپها، کمپرسورهای هوا و کمپرسورهای تبرید نیز قابل استفاده است. مهمترین قابلیت تولید همزمان، امکان بیشترین بهره برداری از انرژی مفید سوخت در مقایسه با سیستمهای سنتی رایج مانند نیروگاهها که تنها از سوخت برای تولید برق استفاده می کنند و یا بویلرهای واحدهای صنعتی که تنها برای تولید بخار به کار می روند، می باشد (۹،۸).

## **۲-۱) ضرورت تحقیق**

انرژی، منبع جدایی ناپذیر برای تمام فعالیتهای مبتنی بر انسان در مفهوم حیاتی است و تقریباً ورودی لازم برای تمام کالاها و خدمات است که در هر مرحله از توسعه جامعه، مدیریت بر مصرف و نگهداری از آن ضروری است. انرژی و مدیریت انرژی دو جنبه از فن

آوری می باشد که می تواند وضعیت اقتصادی یک کشور را از عادی به اوج توسعه اقتصادی بهبود بخشد (۱۰).

تقاضای انرژی، با توجه به افزایش جمعیت، شهرنشینی و توسعه صنعت روز به روز در حال افزایش است. جمعیت جهان در سال ۱۶۶۱ چیزی در حدود ۳ میلیارد نفر، در سال ۲۱۱۱ بالغ بر ۷ میلیارد نفر بوده است. پیش بینی میشود که این رقم تا سال ۲۱۵۱ به ۱۱ میلیارد نفر افزایش پیدا کند (۱۰، ۱۱).

سرايه توليد ناخالص ملي يك کشور با سراه مصرف انرژی در ارتباط است. در جوامع مدرن، سطح توسعه و رفاه اقتصادی یک جامعه به طور مستقیم توسط مقدار تولید و مصرف انرژی اندازه گیری می شود. رکود جهانی و بحران مالی که در سال ۲۰۰۸ آغاز شد منجر به یک تمرکز جدید در تصمیم گیری های مربوط به انرژی شده است (۱۲).

پس از انقلاب صنعتی، اختراعات و مداخلات بشر برای استفاده از سوخت های فسیلی در تأمین تقاضای انرژی در سرتاسر جهان رشد یافته است. آمارها از رشد مداوم در استفاده از منابع انرژی اولیه مبتنی بر سوخت های فسیلی در سال های اخیر و همچنین در آینده های نزدیک حکایت دارد. رقابت شدیدی بین کشورهای جهان و البته بیشتر کشورهای توسعه یافته، در جستجو برای ذخایر جدید نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ وجود دارد (۱۰).

اهمیت تولید همزمان ناشی از مسائل مالی و صرفه جویی انرژی است. هر واحدی که مصرف کننده قدرت الکتریکی بوده و به انرژی حرارتی احتیاج داشته باشد یک کاندید در مورد تولید همزمان میباشد. از طرفی، سهم بسیار زیادی از مصرف انرژی، مربوط به انرژی

سرمایشی و گرمایشی است که می توان از انرژی حرارتی تلف شده سیستم های تولید پراکنده برای این منظور استفاده کرد؛ در نتیجه، علاوه بر کاهش تقاضای انرژی الکتریکی از شبکه، بازده سیستم های تولید پراکنده به واسطه تولید هم زمان برق و حرارت افزایش می یابد (۱۳).

امروزه علاوه بر تغییر قیمت در بازار برق و بازده انرژی، نگرانی هایی هم در خصوص افزایش گازهای گلخانه ای وجود دارد که با تولید همزمان برق، حرارت و سرما می توان انتشار گازهای گلخانه ای را کاهش داد. همه این عوامل علاقه به استفاده از سیستمهای تولید هم زمان انرژی حرارتی و CCHP را افزایش داده است (۶).

نگرانی های اقتصادی، زیست محیطی و بحران انرژی به یک نیاز اجتناب ناپذیر برای اقدام فوری و موثر در مورد بهینه سازی مصرف انرژی منجر شده است. یکی از راهکارهای بهبود وضعیت انرژی و محیط زیست استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر است. اما متناوب بودن تولید و کوچک بودن نیروگاههای تولید این نوع از انرژی با ساختارهای عملیاتی صنعت امروز سازگار نیست. بهینه سازی در مصرف انرژی همچنین می تواند با کاهش اتلاف انرژی و بالا بردن راندمان دستگاه های تولیدکننده انرژی نیز صورت پذیرد. از همین رو صرفه جویی انرژی از طریق سیستم های تولید پراکنده به عنوان یک راهکار اساسی در حال توسعه می باشد (۱۴).

## ۳-۱) روش ها

در این تحقیق ابتدا مطالعات و تحقیقات گذشته مورد بررسی قرار می گیرد سپس با استفاده از اطلاعات مربوط به سوخت گاز طبیعی به تجزیه و تحلیل سوخت و واکنشهای آن پرداخته می شود و همچنین آمار مصرف انرژی در شرکت مهبان دارو مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد. سپس به مدلسازی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما پرداخته خواهد شد و پس از مدلسازی، سناریوهای متفاوتی در نظر گرفته می شود و با توجه به محدودیتهای میکروتوربین گاز و راندمان انرژی، چیلر جذبی بهینه می گردد. سپس با استفاده از سناریوی بهینه به مدلسازی سیستمهای بازیافت انرژی و تامین انرژی سیستمهای حرارتی و برودتی پرداخته می شود. در نهایت سناریوهای متفاوتی از سیستمهای مذکور در نظر گرفته می شود و با توجه به مسائل فنی و اقتصادی سناریوهای در نظر گرفته شده بهینه و ارائه می گردد.

## ۴-۱) اهداف

بخش صنعت و تجارت مهمترین مشتری سیستم تولید مشترک می باشد. به طوری که در سالهای اخیر با توجه به رشد سریع سیستم تولید مشترک توربین گاز در بخش صنعت، کارایی کارخانه ها به طور قابل توجهی افزایش یافته و هزینه های نصب کاهش یافته است. علاوه بر آن سیستم های یکپارچه به سادگی و سریع ساخته و نصب می شوند.

در سیستمهای تولید همزمان از انواع تجهیزات استفاده شده و ممکن است برای رفع نیاز به خصوص، در یک محل مشخص طراحی گردند. به طور کلی اجزای اصلی یک سیستم تولید همزمان شامل محرک اولیه، سیستم بازیافت حرارت و سیستمهای تولید کننده حرارت و

برودت با استفاده از حرارت بازیافتی می باشد. انتخاب پیکربندی تولید همزمان وابسته به نوع چرخه تولید همزمان، قدرت و حرارت موردنیاز و هدف ها و تکنیک های بازیافت حرارت می باشد. عمومی ترین اشکال سیستم تولید همزمان بر اساس توربین گاز، موتور دیزل (احتراق داخلی) و سیکل توربین بخار می باشد (۱۵).

از سه تکنولوژی یاد شده، تولید مشترک توربین گاز، سریعترین پیشرفت را در سال های اخیر تجربه کرده است. به کارگیری چیلرهای جذبی در سیستم های تولید همزمان می تواند بخش مهمی از نیازهای سرمایشی را بدون هدر دادن مقدار زیادی انرژی، فراهم کند. همچنین مبدل های حرارتی برای استفاده از گازهای دودکش توربین های گازی در تولید بخار برای مصارف گرمایشی بسیار مفید واقع می شوند (۱۶). در این پژوهش سعی شده است با چیدمان تجهیزات تولید همزمان به گونه های مختلف، سناریوهای متفاوتی طراحی شود. این سناریوها به منظور تولید همزمان برق، حرارت و سرما طراحی شده اند. با توجه به ضروریات بیان شده، یافتن بهینه ترین سناریو از لحاظ اقتصادی، تامین الکتریسیته، حرارت و سرمایش مورد نیاز با حداکثر کارایی سیستم CCHP از مهمترین اهداف این پروژه می باشد.

## **۵-۱) جنبه های نوآوری**

از مهمترین جنبه های نوآوری این پژوهش می توان به طراحی مفهومی یک سیستم تولید همزمان بهینه جهت تأمین مصارف برق، حرارت و سرمایش شرکت داروسازی مهبان دارو و افزایش راندمان انرژی اشاره نمود.



## فصل دوم کلیات



## ۲-۱) تولید برق و انرژی

ابتدای قرن بیستم تولید قدرت الکتریکی در طفولیت خود بوده و بیشتر واحدهای صنعتی تمام قدرت الکتریکی خود را خود تولید کرده و غالباً قدرت تولیدی را به همسایه های خود نیز ارائه می کردند. این واحدهای صنعتی در واقع اولین تولید کنندگان انرژی همزمان بوده اند. عمده محرکهای اولیه در آن زمان موتورهای بخاری رفت و برگشت بوده و بخار خروجی با فشار پایین برای کاربردهای گرمایش استفاده می گردید. بین سالهای اولیه دهه ۲۰ تا دهه ۷۰ صنعت برق رشد سریعی پیدا کرد که دلیل آن افزایش دیمانند قدرت الکتریکی بود (۱۷).

همزمان با این رشد سریع یک کاهش عمومی در هزینه های تولید نیروی برق بوجود آمد که عمدتاً بدلیل مسائل اقتصادی ناشی از ابعاد و اندازه ها، فن آوری های کارا و هزینه های کاهش یافته سوخت بود در خلال این مدت، صنایع غالباً تولید الکتریکی خود را به دلایل زیر فراموش کردند:

- ۱- نیروگاههای برق نرخهای برق تولیدی خود را کاهش دادند.
- ۲- قوانین مالیات بر درآمد به جای حمایت از سرمایه گذاری در امر فوق به نفع هزینه های خریداران برق بود.
- ۳- هزینه های مربوط به دستمزدها افزایش یافت.

۴- صنعت علاقمند بود تا نسبت به تولیدات توجه داشته باشد تا اینکه به مسائل جنبی مثل تولید قدرت الکتریکی بپردازد.

تخمینهای مربوط به تولید برق الکتریکی همزمان نشان داد که در خلال سالهای ۱۹۵۴ تا ۱۹۷۶ تولید برق همزمان صنعتی آمریکا از ۲۵ درصد به ۹ درصد در کل تولید برق رسید. از اواسط دهه ۸۰ این مقدار در حدود ۵٪ ثابت باقیمانده است. برای مثال در پایان سال ۱۹۹۹ ۱/۵٪ از کل ظرفیت الکتریکی در آمریکا توسط سیستمهای تولید همزمان بوده است. در خلال دهه ۶۰، ۷۰، صنعت گاز طبیعی تعریف جدید انرژی کل را از مفهوم تولید همزمان ارائه کرد. این تلاش بدلیل ضعفهای اقتصادی نسبی (مثل ارزانی نسبی برق و گرانی سوختها) و نبود قوانین دولتی برای هماهنگی و ارتباط بهتر با نیروگاههای بزرگ خیلی موفق نبود.

در اواخر سال ۱۹۷۳ و دوباره در سال ۱۹۷۹، آمریکا بحرانهای انرژی عمده ای را تجربه کرد که عمدتاً ناشی از کاهش نفت وارداتی بود. بین سالهای ۱۹۷۳ و ۱۹۸۳، قیمتهای سوخت و قدرت الکتریکی ۵ برابر شد. تمام صنایع خریدار قدرت الکتریکی شروع به بررسی صرفه جوئیهای اقتصادی ناشی از تولید همزمان کردند (۱۸).

از دهه ۹۰ به این سو سیستمهای تولید انرژی همزمان با استفاده از گاز طبیعی و پیل سوختی مورد توجه قرار گرفته و با توجه به پیشرفتهای تکنولوژیکی امکان استفاده از سیستم با ظرفیتهای پایین جهت کاربردهای ساختمانی طی پروژه های مختلف به اثبات رسیده است. از آغاز دهه تا کنون وزات دفاع آمریکا حدود سی طرح نمونه جهت استفاده از انرژی همزمان توسط پیل سوختی را در مراکز مختلف پیاده نموده و نتایج حاصل از آن را در تدوین

استراتژی انرژی به کار خواهد بست. این بررسی ها با قوانین دولتی که در جهت کم کردن و یا برداشتن موانع در سر راه تولید همزمان بوجود آمد همزمان گردید(۱۹).

در سال ۱۹۷۸ دولت آمریکا قانون انرژی ملی را تصویب کرد که چندین قانون مهم را در بر داشت. قانون انرژی ملی در واقع قانون مصرف سوخت، قانون سیاست گاز طبیعی و سیاست های قانونی نیروگاه ها را شامل می شد. هر یک از قوانین فوق تأثیر مستقیمی بر تولید مشترک داشت و قانون پورپا سیستم های تولید همزمان برق و حرارت را بدین صورت تعریف کرد که شامل نیروگاه هائی باشد که درصد مشخصی از انرژی ورودی را به صورت انرژی حرارتی مفید خروجی (علاوه بر خروجی انرژی الکتریکی یا مکانیکی) تأمین کنند. دیگر قوانین تصویب شده در اواخر دهه ۱۹۵۰ تا ابتدای سال ۱۹۵۵، به نصب سیستم های تولید مشترک کمک کرد. به خصوص، قانون دولتی مربوط به مدیریت کیفیت آب و هوا تأثیر زیادی بر نصب سیستم های تولید همزمان گذاشت. برای مدیریت آلودگی هوا، قانون اصلی عبارتست از قانون کیفیت هوا سال ۱۹۷۷ که سال های ۱۹۷۰، ۱۹۷۷ و ۱۹۹۰ اصلاحیه هائی به آن افزوده گردید. اساس اولیه در مورد مدیریت آلودگی آب، قانون کنترل آلودگی آب مربوط به سال ۱۹۵۶ می باشد که در سال ۱۹۶۵ با قانون کیفیت آب اصلاح شد و در سال ۱۹۷۲ با اصلاحیه های قانون کنترل آلودگی آب و در سال ۱۹۷۷ با قانون آب تمیز اصلاح گردید. این قوانین و دیگر موارد و تأثیرات آن ها در گسترش پروژه های تولید همزمان کاملاً مؤثر بود. با شروع قرن بیست و یکم، تولید همزمان رشد فزاینده ای را تجربه کرد، چرا که صرفه جوئی انرژی و مالی را به همراه دارد. تکنولوژی های جدید قابل استفاده و قوانین و مقررات جدید وضع شد. معمولاً برق مورد نیاز واحدهای صنعتی، ساختمان های تجاری و ساختمان های

مسکونی از نیروگاه های عمده کشور تأمین می شود. در حالیکه نیاز حرارتی تمام آنها در همان محل تولید می گردد. اما روش دیگری که از دیرباز وجود داشته و امروزه توجه بیشتری را معطوف خود کرده، تولید مشترک برق و حرارت است که عبارتست از تولید همزمان برق، یا توان محوری و حرارت مفید توسط یک سیستم. سالها پیش این فناوری برای اولین بار در نیروگاههای سیکل بخار بکار رفته و از بخار استخراج شده از سیکل برای مصارف گرمایشی کارخانه و واحدهای اطراف آن استفاده می شده است. این عمل گرچه کمی باعث کاهش راندمان نیروگاه بوده اما با تأمین حرارت مورد نیاز واحد از مصرف حجم زیادی سوخت جلوگیری می کرده است. خوشبختانه این ایده تنها به نیروگاه های بخار محدود نشد و در طی این سال ها، بویژه در سال های اخیر، فناوری تولید مشترک برق و حرارت، که بهره وری بالایی را در مصرف انرژی بدنبال دارد، به سایر مولدهای تولید قدرت (مکانیکی یا الکتریکی) گسترش داده شد. به عبارت دیگر امروزه می توان با پیشرفت های صورت گرفته، هر سیستم مولد قدرتی با هر اندازه و کاربرد را به صورت یک واحد مشترک طراحی نمود. به این ترتیب علاوه بر تولید توان الکتریکی یا مکانیکی توسط دستگاه، امکان استحصال حرارت اتلافی مولد یا موتور به صورت انرژی گرمایی قابل استفاده وجود دارد. سیستم های CHP غالباً برای تولید برق و حرارت بصورت همزمان طراحی می شود. یک محرک اولیه (موتور یا توربین) انرژی شیمیایی سوخت را آزاد نموده و به توان مکانیکی در محور خروجی تبدیل می کند. در این موارد، محور محرک با یک ژنراتور کوپل شده و توان الکتریکی تولید می شود. از طرف دیگر، حداکثر راندمان موجود برای محرک اولیه دستگاه و مولد کمتر از ۵۰٪ است و این به معنی اتلاف بیش از نیمی از انرژی سوخت به صورت حرارت می باشد. در این نوع سیستم،

منابع اتلاف این حرارت که عبارتند از گازهای خروجی از محرک اولیه، سیکل خنک کن و روغن روغنکاری، شناسایی شده و با قراردادن مبدل‌های حرارتی، گرمای اتلافی به شکل حرارت با دمای بالا (حرارت قابل استفاده) بازیافت می‌شود (۱۹).

این قوانین و دیگر موارد و تأثیرات آنها در گسترش پروژه های تولید همزمان در این بخش مورد بحث قرار می‌گیرد. با شروع قرن بیست و یکم، تولید همزمان رشد فزاینده ای را تجربه کرد چرا که صرفه جویی انرژی و مالی را به همراه دارد. تکنولوژیهای جدید قابل استفاده شده و قوانین و مقررات جدید وضع خواهد شد (۱۷).

## **۲-۲) سیستمهای پایه تولید همزمان**

با فراهم شدن امکان استحصال حرارت اتلافی در سیستم تولید مشترک برق و حرارت خصوصیات منحصر بفرد این سیستم بدست می‌آید. سیستم CHP بیشترین بهره وری در مصرف انرژی سوخت را دارد به گونه ای که متوسط راندمان یک مولد برق در دستگاه CHP حدود ۳۵٪ و متوسط راندمان یک بویلر ۹۰٪ است. در حالیکه یک سیستم CHP با تولید هر دوی این محصولات راندمانی بیش از ۸۵٪ دارد. یعنی راندمان الکتریکی آن حدود ۳۵٪ و راندمان حرارتی (منظور از راندمان حرارتی عبارتست از انرژی حرارتی تولید شده به انرژی سوخت مصرفی) ۵۰٪ است. از طرف دیگر در مقایسه با سیستم های تولید برق و

تولید حرارت متشابه رایج که به صورت مجزا هستند، حدود ۳۵٪ سوخت کمتری مصرف می کند .

کاهش در مصرف سوخت، هزینه سوخت مصرفی را در سبد اقتصادی واحد کاهش می دهد. همچنین از دید ملی، این صرفه جویی در مصرف سوخت می تواند چه از طریق صادرات و چه از طریق فراهم آمدن شرایطی برای استفاده های سودمند تر از سوخت فسیلی مزیت محسوب شود. به علاوه استفاده هرچه کمتر از سوخت های فسیلی باعث کاهش آلاینده های محیط زیست می شود. سیستم های CHP نه تنها توسط فیلترهایی از آزاد شدن آلاینده هایی مانند  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{UHC}$  جلوگیری می کند بلکه کاهش ۳۵ درصدی سوخت در این دستگاه ها نقش بزرگی در کم شدن تولید آنها دارد. سیستم CHP در زمینه های مختلف صنعتی و کشاورزی (به ویژه گلخانه ها)، تجاری و مسکونی استفاده می شود و بنابراین اندازه های متنوعی از آن وجود دارد. اندازه سیستم CHP برحسب توان الکتریکی تولیدی آن بیان می شود و در یک طبقه بندی رایج در سه طیف عمده تقسیم بندی می شود :

CHP سایز بزرگ

CHP سایز متوسط

CHP سایز کوچک

گرچه به طور قطع نمی توان زمینه استفاده CHP ها را بر این تقسیم بندی منطبق دانست اما عموماً اندازه های بیش از چند مگاوات را در بخش صنعت، کمتر از ۱ مگاوات را در بخش تجاری و اندازه های کوچک را در مصارف خانگی استفاده می کنند. البته مجدداً لازم به یادآوری است که استفاده از CHP نه تنها در تولید برق و آب داغ یا بخار کم فشار محدود

می شود و اتفاقاً در اندازه های بزرگتر آن از توان محور برای به کار انداختن کمپرسورهای چیلر، یخچال های صنعتی و یا هوای فشرده و از حرارت استحصالی برای گرمایش محیط به طور مستقیم، چیلرهای جذبی و حرارت مورد نیاز فرآیندهای صنعتی مانند خشک کن استفاده می شود.

بعد از بحران نفت در سال ۱۹۷۳ و افزایش قیمت نفت، کشورهای صنعتی با مشکل بزرگی مواجه شدند و راهکار های جدیدی را برای رهایی از وابستگی به سوخت های فسیلی و صرفه جوئی در مصرف انرژی در صنایع وابسته به سوخت های فسیلی و همچنین بالا بردن تکنولوژی ها به دو منظور کاهش مصرف انرژی در صنایع و استفاده بهینه از انرژی بکار بردند. از مفاهیم و کلیات جمله این فعالیتها می توان به مواردی همچون افزایش تولید زغال سنگ، استفاده از منابع انرژی های تجدید پذیر، توسعه نیروگاه های هسته ای، صرفه جوئی در مصرف انرژی، عایق های حرارتی پیشرفته، افزایش کارایی منابع حرارتی (بویلرها و . . .)، زباله سوزها و نیروگاه های زباله سوز و تولید مشترک حرارت و توان اشاره کرد. در نیروگاه های مرسوم حرارتی تنها یک سوم انرژی موجود و حاصل از سوختن نفت (فرآورده های آن) یا زغال سنگ به توان الکتریکی تبدیل می شود و دو سوم انرژی از طریق آب نیم گرم در برجهای خنک کننده و ( البته مقدار کمی ) در مسیر فرآیند اتلاف می شود. تغییر در طراحی و عملکرد یک نیروگاه تولید توان به تولید مشترک حرارت سودمند و توان، کاربرد و استفاده از انرژی را توسعه و بهبود می بخشد. البته حرارت بدست آمده بایستی کیفیت، مقدار و دمای بالا و کافی را برای آب گرم مورد نیازخانگی، تجاری و ساختمان های عمومی یا بخار مورد نیاز

صنایع را جهت فرآیندهای آن تأمین نماید. بنابراین دو کاربرد مهم برای حرارت سودمند وجود دارد:

۱- گرمایش ناحیه یا بخش خاص (تجاری، مسکونی)

۲- استفاده در صنعت جهت فرآیندها

که این مباحث در همان سال های ۱۹۷۳ و بطور کلی در دهه ۷۰ شکل جدی تری به خود گرفت و گام های بلند و متعددی در این زمینه ها برداشته شد. البته مورد دوم از استقبال بیشتری (در کشورهای توسعه یافته) برخوردار بود. حالت اول مربوط می شود به شبکه گرمایش ناحیه ای که حرارت تغذیه توسط آب داغ در دمای بین ۸۰-۱۵۰ درجه سانتیگراد صورت می پذیرد. در حالت دوم بخار داغ یا گازهای داغ (خروجی از توربین گاز یا بخار) گرمای مورد تقاضا را بر آورده می نمایند. در تعریف تولید مشترک حرارت و توان و استفاده از حرارت مفید، موارد زیر شامل این حرارت سودمند نمی گردد:

- آب گرمی که از کندانسور نیروگاه خارج شده و مصرف آن در بخش کشاورزی و استخراج پرورش ماهی می باشد.

- زباله ها و آشغال هایی که به عنوان سوخت در نیروگاه های زباله سوز مورد مصرف قرار گرفته و تولید توان الکتریکی می نماید.

تولید همزمان دو شکل مختلف انرژی مفید و مورد استفاده را با به کارگیری یک منبع اولیه انرژی، تولید همزمان می گویند. دو شکل مختلف انرژی عبارتست از :

- انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی



## - انرژی مکانیکی و انرژی حرارتی

کاربرد CHP در صنایعی می باشد که همزمان به انرژی الکتریکی و بخار فشار پائین جهت فرآیند نیاز دارند. این تکنولوژی فرصتی برای کاهش مصرف انرژی اولیه ( سوخت نیروگاه ) و کاهش هزینه می باشد در حالی که میزان انرژی الکتریکی و حرارتی مطلوب فراهم می شود. سیستم تولید توان و بخار متداول ۴۰٪ انرژی اولیه بیشتری نسبت به سیستم تولید مشترک حرارت و توان برای تولید انرژی یکسان نیاز دارد.

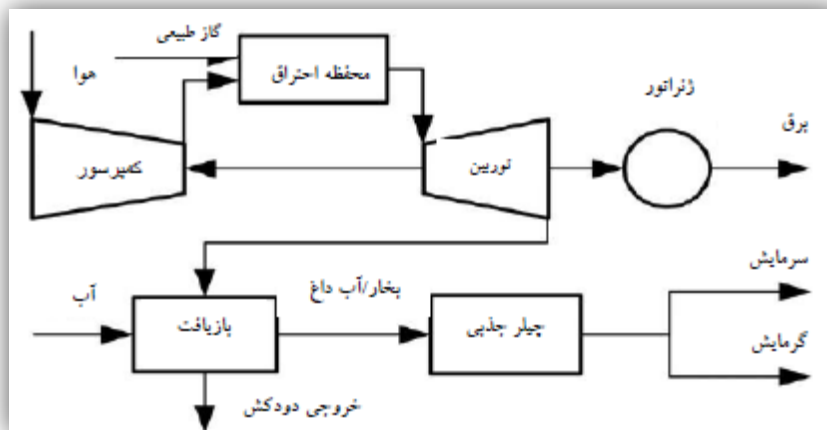
همانطور که در فصل قبل نیز اشاره شد، سیستم های تولید همزمان برق حرارت و سرما از جمله مهمترین سیستم های تولید همزمان می باشد که در این بخش به اختصار به بررسی این سیستم ها می پردازیم. سیستم های CCHP از یک منبع حرارتی برای ایجاد سرمایش استفاده می کند. این حرارت عمدتاً از گرمای اتلافی یک سیکل قدرت تامین می گردد که می تواند در یک سیکل تبرید جذبی به عنوان محرک حرارتی در نظر گرفته می شود. بنابراین استفاده از این گرمای اتلافی در نهایت منجر به کاهش مصرف انرژی اولیه و سوخت های فسیلی می شود (۱۸). در شکل ۱ یک سیستم CCHP عمومی نشان داده شده است که شامل یک سیکل توربین گاز، ژنراتور، بویلر بازیافت گرما<sup>۱</sup> (HRS) و یک چیلر جذبی<sup>۲</sup> می باشد. نیروی محرکه توربین گاز می تواند توسط گاز طبیعی تامین گردد و کار مکانیکی حاصل توسط یک ژنراتور به برق تبدیل می شود. همزمان چیلر جذبی که توسط حرارت بازیافت

---

<sup>۱</sup> Heat Recovery Steam Generation

<sup>۲</sup> Absorption Chiller

شده از HRSG کار می کند می تواند عمل سرمایش را در فصل تابستان و عمل گرمایش را در فصل زمستان فراهم نماید.



شکل ۲-۱- شماتیک یک سیستم CCHP متداول (۲۰)

در سیستم های CCHP عامل ایجاد قدرت در سیکل، محرک اولیه<sup>۱</sup> نامیده می شود که می تواند توربین گاز، توربین بخار، موتورهای احتراق داخلی، میکروتوربین<sup>۲</sup> و یا پیل سوختی<sup>۳</sup> باشد. هر یک از این نمونه ها می توانند خصوصیات و محدودیت های متفاوتی بر اساس تولید برق، ایجاد آلاینده ها، شرایط اقلیمی و ... داشته باشند. بخش مهم دیگر سیستم CCHP سیکل تبرید جذبی می باشد که از گرمای هدر رفته بخش های دیگر می تواند برای ایجاد سرمایش و گرمایش استفاده نماید. هر چند ممکن است در بعضی مواقع چیلر با محرک الکتریکی و یا چیلرهایی که با موتور احتراق داخلی کار می کنند و به محرک اولیه متصل می شوند نیز استفاده شود (۲۱).

<sup>1</sup> Prime mover

<sup>2</sup> Microturbine

<sup>3</sup> Fuel cell

از مزایای مهم سیستم های CCHP کاهش آلاینده ها است که در بعضی محرکهای اولیه این امر بیشتر به چشم می خورد از جمله در پیل های سوختی، که در آنها به علت عدم احتراق، تولید  $\text{Co}_2$  و  $\text{No}_x$  به کمترین مقدار در مقایسه با سایر محرکهای اولیه می رسد. چندین روش برای دسته بندی محرکهای اولیه وجود دارد که می توانند بر اساس سوخت مصرفی، جزئیات فنی، محدوده ظرفیت و .... دسته بندی شوند (۲۲).

## ۲-۲-۱) کاربرد سیستمهای تولید همزمان:

در واحد هایی که به طور همزمان به حرارت و توان نیاز دارند، پتانسیل ایجاد تولید مشترک وجود دارد. البته در صورتی که سیستم مصرف انرژی خصوصیات زیر را داشته باشد، صرفه جوئی قابل توجهی در هزینه انرژی بدست آمده و سیستم تولید مشترک جذاب تر و مقرون به صرفه تر خواهد بود. مشخصات یک سیستم ایده آل برای نصب و اجرای تولید مشترک:

- نیاز حتمی به توان الکتریکی
- افزونی موارد استفاده انرژی حرارتی نسبت به انرژی الکتریکی
- الگوهای بار پایدار و ثابت انرژی حرارتی و الکتریکی
- طولانی بودن ساعات بهره برداری فرآیند
- قیمت بالای برق شبکه یا عدم دسترسی به شبکه

انرژی حرارتی مورد نیاز به منظور اهداف زیر مورد استفاده قرار می گیرد :

خشک کردن، پیش گرم نمودن، تولید بخار فرآیند، محرک تجهیزات بازیافت حرارت و تولید آب سرد، آب گرم، سیال داغ و ... بعضی از دامنه های کاربرد کاملاً مؤثر سیستم تولید مشترک عبارتند از :

الف- تولید مشترک در تاسیسات

- سرمایش و گرمایش منطقه ای

ب- تولید مشترک در صنعت

- صنایع غذایی

- صنایع داروسازی

- صنایع کاغذ و مقوا

- پالایشگاه و پتروشیمی

- صنایع نساجی

- صنایع فولاد

- صنایع سیمان

- صنعت شیشه

- صنعت سرامیک

## ج- تولید مشترک در مؤسسات خانگی و تجاری

- بیمارستان

- دانشگاه ها و هتل ها

همچنین برای تأمین برق و نیاز گرمایشی واحد های مسکونی مانند آپارتمان ها، برج ها و حتی برای واحد های مسکونی تک خانوار می توان از آن استفاده کرد. به عبارت ساده تر سیستم CHP برای واحدهایی که نیاز توأمان به برق و حرارت داشته باشند مفید است. لذا برای ترویج فرهنگ استفاده از CHP شرکت های سازنده نیز برای جلب رضایت مشتریان و ساده تر شدن عرضه و خرید و نصب سیستم های CHP کوچکتر از ۱ مگا وات آنها را به صورت پکیج شده تولید می کنند. به این ترتیب علاوه بر اطمینان مشتریان از سلامت دستگاه هنگام خرید، هزینه نصب و تعمیر و نگهداری آن نیز کاهش می یابد. دانستن نیاز واقعی واحد مصرف کننده به برق و حرارت در انتخاب درست اندازه CHP و نحوه استفاده از آن تاثیر فراوانی دارد. یک سیستم CHP مطلوب به گونه ای است که حداقل ۴۵۰۰ ساعت فعال باشد و تا جایی که ممکن است روشن بودن آن مداوم باشد و پی در پی قطع و وصل نشود. این معیار اولیه در انتخاب اندازه CHP به گونه ای موثر است که عدم رعایت آن هزینه های مضاعفی را چه برای خرید دستگاه و چه برای تعمیر و نگهداری بر کاربر تحمیل می کند. از نظر تولید برق در زمان هایی از CHP استفاده می شود که هزینه برق تولیدی در مقایسه با برق خریداری شده مقرون به صرفه باشد ( لذا گاهی در برخی از ساعات شبانه روز خرید برق از شبکه مقرون به صرفه تر خواهد بود).

حرارت تولیدی CHP نیز در اغلب موارد تمام نیاز واحد را پوشش نمی دهد، لذا در کنار آن از یک بویلر نیز استفاده می شود. همچنین توصیه می شود در کنار سیستم CHP یک مخزن آب گرم تعبیه شود که علاوه بر فراهم بودن همیشگی آب گرم، امکان نصب یک آبگرم کن ثانویه (مانند بویلر مذکور) نیز باشد. بدین ترتیب علاوه بر اقتصادی تر شدن سرمایه گذاری، عدم انطباق زمان تولید و مصرف آبگرم برطرف می شود. از آنجائی که امکان فروش برق تولیدی مازاد بر مصرف توسط CHP به شبکه برق وجود دارد، لذا معیار اصلی در انتخاب اندازه آن دیماند حرارتی واحد می باشد، تا مازاد حرارت تولید نشود، اما از طرف دیگر نباید مصرف برق بگونه ای باشد که بار اعمالی کمتر از ۵۰٪ بار نامی سیستم شود چرا که این موضوع افت شدید راندمان را در پی دارد. علاوه بر انتخاب اندازه مناسب، نوع سیستم CHP نیز اولاً برای توانایی تأمین نیازهای کاربر و ثانیاً از لحاظ صرفه اقتصادی، بسیار مهم می باشد (۱،۳).

## **تولید مشترک برق و حرارت در مقیاس کوچک :**

تولید مشترک برق و حرارت در مقیاس کوچک تولید کننده بخشی از حرارت و توان الکتریکی مورد نیاز یک واحد مسکونی تک خانوار است. ابعاد این دستگاه چندان کوچکتر از سایر نمونه های CHP نیست و شاید بتوان گفت جانشین بسیار خوبی برای بویلرهای حرارت مرکزی واحدهای مسکونی است، که آب گرم مصرفی و گرمای خانه را تأمین می کند. اگر چه راندمان بویلر ۸۸٪ و راندمان CHP ۸۵٪ است و نزدیک هم می باشند و قیمت بویلر نیز کمتر است اما CHP علاوه بر تولید حرارت، برق مورد نیاز ساختمان را نیز تأمین می کند. سوخت

مصرفی مقیاس کوچک گاز طبیعی است (طراحی بر اساس سایر سوخت ها نیز وجود دارد) که ۱۰-۲۵ درصد انرژی آن به الکتریسیته و ۷۰-۸۰ درصد آن به حرارت تبدیل می شود.

این میزان برق تولیدی غالباً افزون بر نیاز خانوار است و لذا با فروش مازاد آن، علاوه بر بی نیازی به خرید برق از شبکه، مزیت مضاعفی برای سبد اقتصادی خانوار محسوب می شود. با تولید برق مورد نیاز خانه در محل، علاوه بر کاسته شدن از بار نیروگاه ها، بویژه در زمان پیک مصرف، از ۱٪ تلفات خطوط انتقال نیز جلوگیری می شود که باید گفت تمام این موارد به همراه راندمان بالای CHP در مصرف سوخت و نیز کاهش ۲۵ درصدی مصرف سوخت در مجموع بهره وری انرژی سوخت را به بیشترین حد ممکن می رساند. حرارت تولید شده توسط تولید مشترک برق و حرارت در مقیاس متوسط متناسب با اندازه هر واحد مسکونی مصارف گوناگونی می تواند داشته باشد. در خانه های کوچک ممکن است این سیستم تمام نیاز حرارتی خانه اعم از گرمایش محیط و آب گرم مصرفی را تأمین کند. اما در واحدهای بزرگتر می تواند بعنوان تأمین کننده یکی از این دو بکار برده شود و یا می تواند بعنوان تأمین کننده بار پایه در نظر گرفته شده و باقی نیاز مصرفی توسط بویلر یا آب گرمکن فراهم شود.

تولید مشترک برق و حرارت در مقیاس متوسط علاوه بر مصارف خانگی می تواند برای رستوران ها، دفاتر اداری و شرکتهای کوچک بکار برده شود. همچنین اگر بار حرارتی مورد نیاز واحد بیشتر از توانایی دستگاه مقیاس متوسط باشد می توان از دو یا چند دستگاه بطور موازی استفاده کرد. اما نباید شرایط بگونه ای باشد که بار مورد نیاز کمتر از ۱۰۰٪ توان تولیدی برق دستگاه شود که در این صورت با افت راندمان همراه خواهد بود. افزایش آگاهی

از مزایای سیستم تولید مشترک، انگیزه ای برای نصب و راه اندازی سیستم های تولید مشترک در نواحی مختلف جهان شده است. عمومی ترین اشکال سیستم تولید مشترک براساس توربین گاز، موتور دیزل ( احتراق داخلی) و سیکل توربین بخار می باشد. از سه تکنولوژی یادشده در CHP توربین گاز، سریعترین پیشرفت را در سال های اخیر تجربه کرده است. بخش صنعت مهمترین مشتری سیستم تولید مشترک می باشد. به طوری که در سالهای اخیر با توجه به رشد سریع سیستم تولید مشترک توربین گاز در بخش صنعت، کارآیی کارخانه ها بطور قابل توجهی افزایش یافته و هزینه های نصب کاهش یافته است. علاوه بر آن سیستم های یکپارچه<sup>1</sup> تولید مشترک بسادگی و سریع ساخته و نصب می شوند. سیستم تولید مشترک با موتور دیزل (احتراق داخلی) برای مصرف کننده های کوچکی که نیاز بیشتری به انرژی الکتریکی دارند و یا به کیفیت حرارتی پایینی نیاز دارند مناسب می باشد. بیمارستان ها و ساختمان های تجاری، نمونه ای از مشتریان سیستم تولید مشترک موتور دیزل هستند. سیستم تولید مشترک موتور دیزل هزینه سرمایه گذاری اولیه پائین و در استفاده از سوخت های مختلف انعطاف پذیری دارد. علاوه برآن در این سیستم، برخلاف توربین گاز، درجه حرارت و آب و هوای محیط تأثیری بر آن ندارد. به همین دلیل برای کشورهای با آب و هوای گرم کاملاً مناسب است. سیستم تولید مشترک توربین بخار در صنایع قند و شکر، کارخانجات چوب، صنایع غذایی و غیره موقعیت و قابلیت اجرای بیشتری دارد. در این کارخانجات حتی سوخت این سیستم تولید مشترک می تواند از بیومس تامین شود.

---

<sup>1</sup> Packages



در سیستم های تولید همزمان از انواع تجهیزات استفاده شده و ممکن است برای رفع نیاز بخصوص در یک محل مشخص طراحی گردند. از طرف دیگر، بسیاری از واحدها دارای احتیاجات مشابه بوده و سیستمهای تولید همزمان پکیج ( از قبل طراحی شده ) می توانند این احتیاجات را رفع کرده و از جهت اقتصادی بر سیستمهای مهندسی طراحی از ابتدا، ترجیح داده می شوند(۲۳).

برای راحتی عمل سیستمهای تولید همزمان را غالباً در یکی از ۳ گروه زیر تقسیم بندی می کنند.

۱- صنعتی

۲- اداری

۳- تجاری

انواع و اندازه های سیستم های تولید همزمان در این ۳ بخش تا اندازه ای با یکدیگر تطابق دارند ولی برای تشریح انواع کاربردها این تقسیم بندی سه گانه کار را راحت می کند. در این بخش مثالهایی در مورد انواع کاربردهایی که وجود دارند آورده می شود.

### **بخش صنعتی**

درمقایسه با دیگر بخشهای اقتصادی، بخش صنعت بیشترین، قدیمی ترین و بزرگترین تعداد را در سیستم های تولید، همزمان شامل می شود. همانطور که قبلاً تذکر داده شده، تولید

همزمان در صنعت ابتدائاً در اوائل ۱۹۰۰ برای تامین احتیاجات حرارتی و برقی بصورت کار آمورد استفاده قرا رگرفت. بسیاری صنایع دارای تاریخچه غنی و دائمی از کاربردهای تولید همزمان می باشند. بخش صنعت به دلائل چندی عمده ترین بکار برنده تولید همزمان می باشد. واحدهای صنعتی غالباً بطور پیوسته کارکرده و در آنها نیازهای برقی و حرارتی همزمان وجود داشته و پیشاپیش دارای نیروگاه و پرسنل متخصص مربوطه می باشند. صنایعی که مشخصاً مصرف کننده بالای انرژی هستند بهترین موارد برای تولید همزمان هستند (۱۸).

بسیاری از این صنایع دارای ظرفیت تولید همزمان چند صد مگاوات نیروی برقی در محل هستند. بعلاوه صنایع با ظرفیت متوسط و کوچک نیز می توانند از تولید همزمان استفاده کنند.

## بخش اداری

بخش اداری شامل طیف گسترده ای از مراکز غیر انتفاعی شامل دانشگاهها، کالج ها و مدارس مجتمع عای ساختمانی دولتی، بیمارستانها، مراکز نظامی و دیگر مراکز غیرانتفاعی می باشد. بسیاری از این مراکز اگر هم بطور پیوسته مورد استفاده نباشند در قسمت عمده ای از روز مورد استفاده قرار می گیرند. بعضی مثل بیمارستانها ممکن است از قبل برای مواجهه با شرایط اضطراری دارای سیستم تولید برق اضطراری و پرسنل عمل کننده که بتوان از آنها در سیستم تولید همزمان استفاده کرد می باشند. اگرچه یک بیمارستان بزرگ یا یک دانشگاه بزرگ را نمی توان با یک واحد صنعتی بزرگ مقایسه کرد ولی گاهی در این موارد به ۵۰ مگاوات یا بیشتر نیروی برقی تولید شده بصورت همزمان نیاز است (۱۸).

## بخش تجاری

بخشهای تجاری شامل طیف گسترده ای از مراکز انتفاعی شامل تجارتخانه ها، هتلها، متلها، آپارتمانها و مجتمع های مسکونی، رستورانها، مراکز خرید، خشک شوئی های صنعتی و آزمایشگاهها می شود. در اوایل دهه ۹۰ این بخش کوچکترین تولیدکننده های همزمان را شامل شده و مزایای اقتصادی در این بخش در مقایسه با دیگر بخشها کمتر بوده مگر اینکه نرخهای برق بطور غیرعادی بالا باشند. البته از سال ۱۹۹۰ با استفاده از ۱۰۰ کیلو وات به این طرف باتوجه به امکان بکارگیری سیستم برای ظرفیتهای سوختهای گازی و یا پیل سوختی استفاده از این سیستم رشد قابل توجهی از خودنشان داده است که در ادامه به آن خواهیم پرداخت از آنجائیکه بسیاری از این مراکز خصوصیات مشابهی را دارند، غالباً استفاده از سیستم های تولید همزمان آماده و طراحی شده از قبل امکان پذیر می باشد. استفاده از این واحدها ارزانتر از حالتی است که طراحی از ابتدا را شامل شود (۱۸).

### ۲-۲-۲- تجهیزات و اجزاء

سیستم های تولید همزمان شامل چندین دستگاه عمده و بسیاری اجزاء کوچکتر می باشند. در این قسمت به تشریح آنها و راهنماییهای لازم برای انتخاب این تجهیزات و دستگاهها می پردازیم.

بحث زیر به چهاربخش تقسیم می شود:

- محرکهای اولیه
- تجهیزات الکتریکی

- تجهیزات بازیابی حرارت

- چیلرهای جذبی

## محرك های اولیه

محرك های اولیه شامل دستگاه هائی است كه انرژی سوخت را به قدرت محور چرخنده تبدیل كرده تا ژنراتورهای برقی را به حرکت در آورند. محرك های اولیه كه غالباً در سیستم های تولید همزمان استفاده می شوند عبارتند از :

توربین های بخار، توربین های گازی و موتور های رفت و برگشتی.

در این قسمت به تشریح محرك های اولیه می پردازیم.

تفاوت عمده بین محرك های اولیه (الف) ابتدا در سوخت هائی است كه آنها استفاده می كنند، و (ب) در فرآیند احتراق آنها و راندمان حرارت كلی، نوع، مقدار و درجه حرارت انرژی دفع شده می باشد. سیستم های CHP در سه دسته كلی بر اساس نوع محرك اولیه آن تقسیم بندی می شوند كه هر دسته زیر مجموعه هایی دارد:

- سیلندرپیستونی

- توربینی

- پیل سوختی

جدول ۲-۱- مقایسه محرک های اولیه

سیستم CHP	مزایا	معایب	ابعاد موجود
توربین گازی	اعتمادپذیری بالا، آلاینده‌گی پایین، در دسترس بودن، حرارت بالا، عدم نیاز به سیستم خنک‌کنندگی	نیاز به گاز با فشار بالا و یا کمپرسور در ورودی گاز دارد، در بارگذاری کم بازدهی پایینی دارد، با افزایش دمای محیط توان خروجی کم می‌شود	۵۰۰ کیلووات تا ۴۰ مگاوات
میکروتوربین گازی	قطعات متحرک کمتر، ابعاد کوچک و وزن کم، آلاینده‌گی پایین، عدم نیاز به سیستم خنک‌کنندگی	هزینه بالا، بازدهی مکانیکی نسبتاً پایین، محدود به کاربردهای تولید همزمان با دمای پایین می‌باشد.	۳۰-۳۵۰ کیلووات
موتورهای رفت و برگشتی / جرقه ای	بازده بالا همراه با انعطاف پذیری در شرایط عملیاتی بارگذاری جزئی، راه اندازی سریع، هزینه سرمایه گذاری نسبتاً پایین، امکان اورهال در خود سایت با اپراتورهای معمولی، کار کردن با گاز فشار پایین	هزینه تعمیر و نگهداری بالا، محدود به کاربرد های تولید همزمان با دمای پایین می‌باشد، آلاینده‌گی نسبتاً بالا، نیاز به خنک کردن دارد حتی اگر سیستم بازیافت حرارت استفاده نشود، میزان بالایی نویز با فرکانس پایین تولید می‌کند.	کمتر از ۵ مگاوات
توربین بخار	بازدهی کلی بالا، امکان استفاده از هر نوع سوختی، اعتماد پذیری بالا و طول عمر مفید و بالا	راه اندازی کند، نسبت پایین توان الکتریکی به حرارتی	۵۰ کیلووات تا ۲۵۰ مگاوات
پیل های سوختی	آلاینده‌گی و نویز پایین، بازدهی بالا در تمام شرایط بارگذاری، طراحی مطابق با مقیاس موردنظر	هزینه بالا، دوام کم، سوخت نیاز به پردازش دارد به جز مواردی که از هیدروژن خالص استفاده می‌شود	۲۰۰- ۲۵۰ کیلووات

در کاربرد های تولید همزمان، یک پارامتر عمده برای هر یک از محرک های اولیه، نسبت مربوط به نرخ انرژی حرارتی تأمینی و توان الکتریکی خروجی می باشد. این نسبت را نسبت حرارت به توان الکتریکی نامیده که بدون بعد می باشد. مشخص بودن مقدار نسبت حرارت به توان الکتریکی در انتخاب نوع مناسب محرک اولیه برای یک کاربرد خاص مهم می باشد.

### **توربین های بخار :**

از توربین های بخار در نیروگاه ها و صنعت به طور گسترده استفاده می شود. در توربین های بخار از بخار با فشار و درجه حرارت بالای یک بویلر استفاده می کنند. بخار، درون توربین جریان یافته و توربین را به گردش در می آورد. بخار خروجی از توربین در درجه حرارت و فشار پائین می باشد. اختلاف عمده توربین بخار نسبت به موتورهای رفت و برگشتی و توربین های گاز در احتراق است که در خارج و در یک دستگاه مجزا به نام بویلر اتفاق می افتد. این کار اجازه می دهد تا از طیف گسترده ای از سوخت ها از جمله سوخت های منجمد نظیر زغال سنگ یا مواد ضایعاتی جامد استفاده کرد. البته بخار خروجی می تواند برای مصارف گرمایش و یا تأمین انرژی مورد نیاز چیلر جذبی نیز مورد استفاده قرار بگیرد. توربین های بخار در اندازه ها و شکل های مختلف موجود هستند. یک تفاوت عمده در آنها این است که توربین بخار تقطیر کننده است یا غیرتقطیر کننده. توربین های بخارکندانس شونده، اینگونه هستند که بخار در فشار پائین (کمتر از فشار اتمسفریک) از توربین خارج شده بصورتی که بخار را بتواند ریک کندانسور با درجه حرارت هایی نزدیک به درجه حرارت

محیط، تقطیر کرد. توربین های بخار تقطیری بیشترین قدرت برقی را تأمین کرده و بنابراین پر مصرف ترین نوع توربین در نیروگاه ها و سرویس های برقی می باشند. از آنجائی که بخار خروجی، انرژی در دسترس کمی را داراست، از کاربرد توربین های بخار تقطیری برای تولید همزمان صرف نظر می گردد. توربین های بخار غیر تقطیری توربین های بخاری هستند که بخار خروجی آن در فشاری بالاتر از فشار اتمسفریک قرارداد. این توربین های بخار را توربین های بخار با فشار عقب نیز می نامند. بخار خروجی این نوع توربین انرژی کافی برای ایجاد گرمایش در فرآیند یا ساختمان را دارا است. هر دو نوع توربین بخار را می توان به سیستمی که بتوان در آنها بخشی از بخار توربین را در یک یا چند محل و با فشاری بین فشار ورودی و خروجی گرفت، مجهز کرد. بخار حاصل شده را می توان برای نیازهای غیر فرآیندی یا گرمایش در درجه حرارت های بالاتر مورد استفاده قرار داد. توربین های غیر تقطیر کننده در طیف گسترده ای از توان خروجی (۵۰ تا ۱۰۰ مگاوات) وجود دارند. فشارهای بخار ورودی از ۱۵۰ تا ۲۰۰۰ psig بوده و درجه حرارت های ورودی در محدوده ۵۰۰ تا ۱۰۵۰ درجه فارنهایت قرار دارند. بسته به طراحی مشخص و کاربرد بخصوص نسبت حرارت به توان الکتریکی برای توربینهای بخار از ۴ تا ۱۰ متغیر بوده و راندمان حرارتی با بزرگتر شدن اندازه توربین افزایش یافته و می تواند از ۸ تا ۲۰٪ تغییر کند. اگرچه منبع عمده انرژی حرارتی، بخار حاصل شده یا خروجی است، ولی در بعضی موارد اگزوز بویلر نیز می توانند به عنوان منبع ثانویه انرژی حرارتی تلقی گردد (۱،۳).

## توربین های گاز :

توربین های گازی ثابت همانند توربین های بخار در بسیاری از نیروگاه ها به عنوان تجهیزات عمده طرح می باشند. بسیاری از تجهیزات توربین های گازی ثابت مشابه با توربین های گاز هواپیما می باشد. در حقیقت، هم توربین های ثابت ( صنعتی ) و هم توربین های گاز هواپیما در سیستم های تولید همزمان مورد استفاده قرار می گیرند. در توصیف کوتاهی که در پی می آید خصوصیات مهمی که در توربین گاز و در سیستم تولید همزمان بکار گرفته می شود، تشریح می گردد. توربین های گازی در اندازه ها، طرح ها و شکل های مختلفی وجود دارند. در توربین گازی با سیکل ساده از هیچ گونه روش خارجی مثل بازیابی حرارت برای بهبود راندمان استفاده نمی شود. بنابراین راندمان حرارتی توربین های گازی با سیکل ساده را با استفاده از چند روش خارجی می توان افزایش داد، اما در این شرایط طراحی و شکل توربین گاز پیچیده خواهد شد. بسیاری از این تغییرات در توربین گاز با سیکل ساده در جهت استفاده از انرژی گاز های آگروز است تا توان الکتریکی خروجی و راندمان افزایش یابد. البته، این چنین تغییراتی میزان انرژی در دسترس آگروز را کاهش خواهد داد. بنابراین توربین گاز با بالاترین راندمان برای بکار بردن در سیستم های تولید همزمان، ممکن است بهترین انتخاب نباشد. توربین های گازی در طیف گسترده ای از میزان خروجی یعنی از ۱۰۰ کیلو وات تا بیش از ۱۰۰ مگا وات وجود دارند. منوط به نوع طراحی مخصوص، نسبت حرارت به توان الکتریکی برای توربین های گازی می تواند از ۱ تا ۳ تغییر کند. راندمان حرارتی طراحی با اندازه توربین گاز ( سطح قدرت ) و پیچیدگی آن تغییر کرده و با افزایش آن، افزایش می یابد که معمولاً از ۱۵ تا ۳۰٪ می باشد، در مقایسه با توربین های بخار بالاتر بودن راندمان



حرارتی باعث پائین تر بودن نسبت حرارت به توان الکتریکی می شود. این راندمان بالا برای کار کرد در حالت تمام بار ( از جهت طراحی ) می باشد. در حالت کارکرد با بخشی از بار، راندمان توربین گاز بسرعت کاهش پیدا می کند. به علت مقادیر زیاد هوای اضافی مصرفی ( جرم هوای کل در مقایسه با جرم سوخت در حدود ۱۰۰ برابری باشد ) در فرآیند احتراق توربین گاز، گاز اگزوز خروجی دارای غلظت نسبتاً زیادی نیتروژن و اکسیژن می باشد. توربین گازی فاقد سیکل خنک کن است و تنها منبع حرارتی گاز های خروجی از توربین است که دمایی در حدود ۵۰۰ درجه سانتی گراد دارد. این منبع امکان تولید بخار در واحد HRSG را فراهم می سازد که یک بویلر ساده و بدون آتش است. بدین شکل ۶۰٪ انرژی سوخت به شکل حرارت بازیافت شده و راندمان کلی ۸۵-۹۰٪ برای CHP قابل دستیابی است. به علاوه در واحد های بزرگتر می توان با به کار گیری روش احتراق تکمیلی راندمان کلی را تا ۹۵٪ نیز افزایش داد که با کاهش آلاینده گی سیستم نیز همراه است، چرا که به دلیل خنک کاری درون توربین مقداری هوای اضافه مصرف می شود و لذا درصد اکسیژن در گاز های خروجی حدود ۱۲-۱۴٪ می باشد که قابل ملاحظه بوده و احتراق مجدد را ممکن می سازد. به این ترتیب به حرارت تولیدی CHP افزوده می شود. همان طور که گفته شد علاوه بر تولید بخار می توان از حرارت بازیافتی در oven (اجاق) یا خشک کن نیز استفاده کرد. بنابر این می توان اگزوز توربین گاز را به صورت هوای بسیار گرم شده در نظر گرفت و از آن برای مصارف فرآیند یا گرمایش استفاده کرد. در توربین های گازی می توان از سوخت های مایع نظیر سوخت جت یا نفت سفید و یا سوخت های گازی نظیر گاز طبیعی یا پروپان استفاده کرد. بالاترین عملکرد را می توان با استفاده از سوخت های مایع بدست آورد اما باید توجه داشت کمترین میزان

آلایندگی از کارکردن با گاز طبیعی گزارش شده است. برای سیکل های کارکرد به صورت دائمی (پیوسته) و مقطعی مقادیر توان الکتریکی متفاوتی برای توربین های گازی تعریف می شود. توان الکتریکی در حالت دائمی نسبت به حالت کارکرد مقطعی، کمی کمتر است تا عمر و دوام کارکرد بیشتر باشد. در هر دو حالت، قدرت خروجی برای شرایط کارکرد استاندارد (که به نام شرایط ایزو نامیده می شود) می باشد. شرایط ایزو شامل فشار ۱ اتمسفر، ۱۵ درجه سانتی گراد هم سطح دریا و بدون افت فشار در ورودی و در اگزوز می باشد. برای یک کاربرد به خصوص، می بایست شرایط محلی در نظر گرفته شود تا توان نامی تنظیم شده و شرایط کارکرد واقعی مشخص شود. بیشتر تولیدکننده ها تنظیمات پیشنهادی را بسته به اختلاف بین شرایط محلی و استاندارد برای مصرف کننده ارائه می کنند. به خصوص درجه حرارت هوای ورودی در محل که تأثیر زیادی بر خروجی توربین گاز دارد. با افزایش درجه حرارت هوای محیط، عملکرد یک توربین گازی کاهش پیدا می کند که علت آن کاهش دانسیته می باشد. توربین های گاز نسبت به توربین های بخار، احتیاج به نگهداری بیشتر و تخصصی تری دارند. غالب تعمیرات اساسی بعد از ۷۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ ساعت کارکرد بسته به نوع استفاده و تولید کننده انجام می گیرد. طراحی توربین های گاز هواپیما بدین صورت است که قسمت داغ را به تولید کننده برمی گردانند و به جای آن یک قسمت آماده شده و تعمیر شده را جایگزین می کنند تا زمان توقف را به حداقل برسانند البته این تعمیر اساسی گران تر می باشد. توربین های گاز صنعتی به نحوی طراحی می شوند که تعمیرات اساسی در محل انجام گرفته و در نتیجه عمده عملیات ارزان تر می باشد.

## موتورهای رفت و برگشتی :

نوع دیگری از محرک های اولیه برای سیستم های تولید همزمان احتراق داخلی (IC) موتورهای رفت و برگشتی می باشد. اگرچه از موتورهای پره ای نیز می توان در سیستم های تولید همزمان استفاده کرد، ولی کاربرد خاصی برای آنها شناخته نشده است موتورهای احتراق داخلی به چندین صورت وجود دارند و شاید معمول ترین شکل از موتورهای رفت و برگشتی، موتورهای بنزینی با احتراق جرقه ای در اتومبیل ها باشد. عمده موتورهای رفت و برگشتی را در سیستم های تولید همزمان با اندازه های متوسط تا بزرگ - موتورهای دیزل ثابت که با سوخت دیزل ( گازوئیل) یا در یک حالت دو گانه با گاز طبیعی کار می کنند، تشکیل می دهد. این موتور ها ضمن وجود برخی خصوصیات مشترک با یکدیگر، موارد اختلافی نیز در کاربردهای تولید همزمان دارند. قدرت موتورهای رفت و برگشتی همانند توربین های گازی و برای دو حالت کار دائم و مقطعی ارائه شده است. قدرت اسمی موتورهای رفت و برگشتی همانطور که برای توربین های گاز نیز مطرح است در شرایط استاندارد درجه حرارت محیط، فشار و اختلاف سطح نسبت به دریا بوده و قدرت استاندارد باید برای شرایط محلی نصب دستگاه مزبور تنظیم گردد. این نوع موتورها برای کاربرد تولید همزمان، در بسیاری از سطوح قدرت و با طرح های مختلف وجود دارند. این سطوح قدرت می توانند از کمتر از ۵۰ کیلو وات تا بیشتر از ۲۰۰ مگا وات تغییر کنند. بعضی از تولید کننده ها حتی سیستمهای تولید همزمان کوچک را با قدرت خروجی کم (تا میزان ۶ کیلو وات) نیز پیشنهاد می کنند.

سیستم های با موتور سیلندر پیستونی رایج ترین محرک اولیه در سیستمهای CHP در اندازه های ۱ تا ۱۰۰۰ کیلو وات است. استفاده از این نوع موتور زمینه ای مناسب برای سازندگان این سیستم ها فراهم می آورد تا هرچه بیشتر به خواسته های مصرف کنندگان نزدیک شوند. پنج نوع اصلی موتور که امروزه بکار می رود عبارتند از :

- موتور صنعتی

- موتور خودرو

- موتور دیزل

- موتور گازی

- موتور استرلینگ

سوخت اغلب این موتورها گاز طبیعی است که در موتورهای گازی با سیستم جرقه زنی مصرف می شود. همچنین گاهی در واحدهای بزرگتر از ۵۰۰ کیلووات موتورهای با قابلیت مصرف دوگانه سوخت گاز- دیزل به چشم می خورد.

### **موتور های صنعتی :**

موتورهای صنعتی، موتورهای پر قدرت، بزرگ و از نوع ثابت هستند که برای تولید قدرت مطمئن با حداقل هزینه تعمیر و نگهداری طراحی شده اند. اجزاء این موتورها با هدف بیشترین استحکام در برابر سایش و همچنین سادگی در تعمیر و نگهداری آن ساخته شده است و طول عمر بالایی دارند. بگونه ای که نمونه های زیادی با ساعت کارکرد بیش از

۵۰۰۰۰ ساعت وجود دارد. این موتورها در هر دو نوع جرقه ای با سوخت گاز و دیزل موجود است که البته در سیستم های CHP بیشتر از نوع جرقه ای استفاده می شود. کاربرد اصلی این موتورها برای پمپ کردن سیالات و نیز به کار انداختن ژنراتورها در موقع قطع برق بوده است (مانند صنعت نفت). موتورهای صنعتی معمولاً در سیستم های CHP با توان الکتریکی بیش از ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلو وات به کار برده می شود.

### **موتور خودرو:**

عموماً موتور خودرویی که در سیستم CHP بکار برده می شود، موتورهای کامیون است که با اصلاحات و تغییراتی در ساختمان آن گاز سوز شده، توسط سیستم جرقه کار می کنند. امروزه استفاده از این نوع موتورها گستره بیشتری پیدا کرده است. در سیستم های CHP تا اندازه ۲۰۰ کیلووات قابل استفاده است و از طرف دیگر برای واحدهای بسیار کوچک CHP با اندازه های کمتر از ۳۰ کیلووات کارایی زیاد دارد. طول عمر این نوع موتور در سیستم CHP به خاطر سرعت کار کرد مداوم ۱۵۰۰ دور بر دقیقه است و در شرایط پایدار بیش از طول عمر آنها بر روی خودرو است.

### **موتور دیزل / ژنراتورهای اضطراری :**

دو نوع مصرف عمده موتور دیزل عبارت است از ماشین های سنگین جاده ای و مولدهای برق اضطراری که در هر دو سوخت آن گازوئیل است. یکی از راه های تهیه CHP برای یک واحد، تبدیل مولد برق اضطراری موجود به سیستم CHP است، که در این صورت هزینه سرمایه گذاری کمتری بر مصرف کننده تحمیل می شود. اگرچه غالباً محرک این

ژنراتورها نیز از نوع موتورهای صنعتی است، اما در موفقیت آمیز بودن این تبدیل در دراز مدت شبیهاتی وجود دارد. عموماً CHP بدست آمده، از میزان نیاز آن واحد بزرگتر است که هم از نظر راندمان و هم از نظر اقتصادی اصلاً موجه نیست و نیز هزینه تعمیر و نگهداری در مقایسه با نمونه های مشابه بیشتر است. از لحاظ عملکرد نیز نسبت حرارت به توان الکتریکی (H/P) موتورهای دیزل کمتر از موتورهای جرقه ای با سوخت گاز طبیعی می باشد.

### **موتور گازی :**

موتورگازی مانند موتور خودرو از انواع احتراق جرقه ای است و با سوخت گاز طبیعی یا گاز مایع کار می کند. به عبارت دیگر مکانیزم عملکرد این موتور همانند موتور خودرو است، اما ساختمان آن برای استفاده در سیستم های CHP بسیار کوچک در اندازه های کمتر از ۶ کیلووات تخصصی شده است. موتور گازی تک سیلندر است و توانایی کار در مدت زمان زیاد را دارد. امروزه این موتور از موتور های موفق و مناسب در سیستم های محسوب می شود و نمونه های تجاری آن با قیمت مناسب عرضه شده است. اما از طرف دیگر اندازه بزرگ موتور و تولید صدای زیاد آن که برای واحدهای مسکونی نا مناسب است، به همراه هزینه تعمیر و نگهداری نسبتاً بالای آن از عیوب قابل ذکر موتور گازی است.

### **موتور استرلینگ :**

موتور استرلینگ یک نوع موتور حرارتی است که بر خلاف موتور هایی که تا کنون نام برده شد، از انواع برون سوز است. گرچه امروزه موتور استرلینگ از موتورهای پر کاربرد

محسوب نمی شود، اما توانایی آن را دارد که از بازدهی بیشتری نسبت به موتورهای دیزل برخوردار باشد. مهمترین ویژگی های این موتور عبارتند از:

- امکان استفاده از سوخت های متنوع از جمله بیوگاز

- آلاینده های کم

- نیاز اندک به تعمیر و نگهداری

- تولید صدای کم در هنگام کار

با این حال دو نقطه ضعف بسیار مهم در موتور استرلینگ وجود دارد که از گسترش آن در بازار مصرف ممانعت می کند. اول آن که این نوع موتورها قبل از راه اندازی و تولید قدرت مفید، نیاز به زمان برای گرم شدن دارند. مورد دوم عدم توانایی انطباق سریع موتور با تغییرات بار است. امروزه کاربرد جدیدی که برای موتور استرلینگ پیشنهاد شده است، سیستم های CHP که در اندازه های کمتر از ۱۰۰ کیلووات قابل استفاده می باشند. در این میان نصب موتور استرلینگ در سیستم های مقیاس متوسط با موفقیت بیشتری همراه بوده است و نمونه های تجاری آن نیز در بازار مصرف عرضه شده است. راندمان الکتریکی بدست آمده از موتورهای سیلندر پیستونی ۳۰-۴۰٪ است ( و برای موتورهای استرلینگ ۲۵-۲۹٪ است) که در میان سایر انواع محرک ها بیشترین می باشد و نسبت توان حرارتی به توان الکتریکی (H/P) ۱/۱ و ۱/۲ دارد. در این نوع سیستم های CHP تا ۹۰٪ اتلاف حرارتی موتور به صورت آب داغ یا بخار کم فشار قابل بازیافت است. منابع بازیافت حرارت عبارتند از:

آب خنک کن پوسته موتور

## سیستم روغن کاری

### گازهای خروجی از موتور

به خاطر وجود مشکلات ناشی از فشار، خوردگی و شوک حرارتی نمی توان مستقیماً از سیال موجود در سیستم حرارتی سایت استفاده کرده به همین دلیل به کار گیری انواع مبدل های حرارتی لازم است. در برخی از انواع طراحی، بازیافت حرارت از گازهای خروجی در دو مرحله انجام می شود. در مرحله اول که در همه انواع طراحی ثابت است، آب داغ یا بخار کم فشار توسط یک مبدل پوسته لوله تولید می شود. در انتخاب این مرحله دمای گاز های خروجی به حدود ۱۲۰ درجه سانتی گراد می رسد که مجدداً بنابر نیاز مصرف کننده توسط یک مبدل می توان حرارت بیشتری بازیافت نمود. بدین ترتیب ۵۰-۶۰٪ انرژی سوخت ورودی بشکل حرارت بازیافت می شود و برای این سیستم CHP راندمان ۸۰-۹۰٪ قابل دسترسی است. برای موتورهای رفت و برگشتی، احتراق داخلی که توسط مایع خنک کاری می شوند (عمده موتورهای مورد نظر در اینجا ) مایع خنک کاری، منبع ثانویه برای انرژی حرارتی می باشد. اگرچه گاز خروجی در درجه حرارت های بالا نیست اما انرژی حاصل از آن را می توان برای تولید آب گرم یا بخار فشار پائین استفاده کرد. چند نوع طراحی برای بازیابی انرژی در مایع خنک کاری وجود دارد. در این طرح ها از یک یا چند مبدل حرارتی مستقیم یا غیر مستقیم برای تولید آب گرم یا بخار فشار پائین استفاده می کنند. مبدل های حرارتی مایع به مایع می توانند با راندمان های بالائی بیشترین انرژی را بازیابی کنند ( البته در درجه حرارت های نسبتاً پائین ).



دیگر منابع انرژی برای موتورهای رفت و برگشتی شامل خنک کننده های روغن و توربوشارژر افتر کولرها هستند. این انرژی معمولاً در درجه حرارت های ۱۶۰ درجه فارنهایت بوده و آن را تنها می توان برای احتیاجات با درجه حرارت پائین بازیابی کرد. دیگر فایده موتور رفت و برگشتی مسأله نگهداری و تعمیرات آن است که در مقایسه با توربین گاز احتیاج به تخصص پائین تری دارد. اما از طرف دیگر نگهداری در دفعات و با هزینه های بیشتر انجام می گیرد.

در اینجا مهمترین محرک های موجود در سیستم های CCHP ارائه می گردد (۲۴) - (۲۵، ۲۶).  
**توربین های گازی :** عمده‌تاً در سیستم های تولید پراکنده در مقیاس بزرگ استفاده می شود و اندازه های کوچکتر از ۱ مگاوات به علت بازدهی الکتریکی پایین و هزینه اولیه بالا به ازای واحد برق تولیدی چندان اقتصادی نیست. نصب آنها نسبت به توربین های بخار آسانتر می باشد، هزینه های تعمیر و نگهداری آنها در مقایسه با موتورهای رفت و برگشتی پایین تر بوده اما بازده آنها نیز کمتر می باشد. همچنین آلاینده های کمتری در مقایسه با موتورهای رفت و برگشتی تولید می نمایند. از معایب توربین های گازی مصرف بالای سوخت های فسیلی بوده و نیز به علت دمای بالای گازها، مواد به کار رفته در ساخت آنها قیمت بالاتری دارند. همچنین عملکرد آنها در ارتفاع بالاتر و نیز هوای گرم کاهش می یابد.

**توربین های بخار:** توربین های بخار بیشترین کاربرد را در نیروگاهها و صنایع دارند و می توانند در کنار یک بویلر با سوخت های متنوع به کار روند، همچنین عمر آنها بالا بوده و با توجه به هزینه های کارکرد و نگهداری، مناسب و قابل اطمینان می باشند. اما بعضی از

مشکلات از جمله بازده الکتریکی پایین، زمان راه اندازی آهسته و عملکرد ضعیف تر در بارهای جزئی کاربرد آنها را محدودتر می نماید و بنا براین کاربرد آنها عمدتاً در سیستم های بزرگ می باشد.

#### **موتورهای احتراق داخلی رفت و برگشتی: دو نوع موتور جرقه ای و تراکمی به عنوان**

محرکهای اولیه در سیستم های CCHP می تواند استفاده شود. این موتورها با هزینه های اولیه پایین تری نسبت به سایر محرکهای اولیه می باشند. زمان راه اندازی آنها سریع بوده و در بارهای جزئی عملکرد خوبی دارند و بنابراین به عنوان محرک های اولیه با انعطاف پذیری بالا شناخته می شوند. این موتور ها عمدتاً در سیستم هایی با ظرفیت کمتر از ۱ مگاوات به کار گرفته می شوند. از معایب این سیستم ها ارتعاش بالای آنها بوده و نیز تعداد زیاد قطعات متحرک، هزینه های تعمیر و نگهداری را بالا می برد. از طرفی آلاینده های زیاد خصوصاً  $\text{NO}_x$  از معایب عمده این سیستم ها می باشد (۲۲).

#### **میکروتوربین ها: میکروتوربین ها از تکنولوژی های توربوشارژر بر گرفته شده که در**

کامیونهای بزرگ یا توربین ها در واحد های برق کمکی هواپیما یافت می شوند و ظرفیتی در دامنه ۲۵ کیلووات تا ۵۰۰ کیلووات دارند. میکروتوربین ها انواع سوخت ها شامل گاز طبیعی، پروپان و بیوسوخت ها را فراهم می کنند. بازده های انرژی الکتریکی ۲۵ درصد تا ۳۰ درصد با استفاده از تقویت کننده ها دارند. میکروتوربین ها بخش های متحرک کمتری از تجهیزات تولیدی دیگر با توانایی مشابه دارند که پتانسیل کاهش هزینه نگهداری را به وجود می آورد. گرچه توانایی تولید میکروتوربین ها با دامنه بالای مشخص شده در مقیاس میکرو CHP

وجود دارد، میکروتوربین ها پتانسیل قابل توجهی در کاربرد های تولید برق در محل مانند خانه ها، مجتمع های آپارتمانی و ساختمانهای تجاری کوچک دارند.

گرمای تلف شده در میکروتوربین عمدتاً به شکل گازهای خروجی داغ است. این گرما برای تقویت ژنراتور بخار، گرمایش غیر مستقیم یک ساختمان، تخصیص به دستگاههای ذخیره حرارت یا استفاده در سیستم های سرد کننده، هدایت شونده با گرما مناسب می باشد. در بیشتر طرح ها از ریکاپراتورها به کار می گیرند که مقدار گرمای موجود برای کاربرد های میکرو CHP را محدود می کنند. میکروتوربین ها انتشارات گاز گلخانه ای و صدای نسبتاً پایین و همچنین هزینه های نگهداری پایین دارند. مزیت دیگر این است که میکروتوربین ها در سایز یا فوت نسبتاً کوچک هستند. انعطاف پذیری و مقدار گازهای خروجی داغ، میکروتوربین ها را یک تکنولوژی سودمند برای میکرو CHP و کاربردهای تولید همزمان می سازد (۱۷).

## کاربرد

بازار میکروتوربین ها شامل ساختمانهای تجاری و صنایع سبک می باشد. میکروتوربین ها می توانند برای برق آماده به کار، کیفیت و قابلیت اطمینان برق، پیک زدایی و کاربردهای تولید همزمان مورد استفاده قرار بگیرند. میکروتوربین ها برای موسسات تجاری کوچک مانند رستوران ها، هتل ها، متل ها، ادارات کوچک و فروشگاههای خرده فروشی مناسب هستند. همچنین توسعه تکنولوژی میکروتوربین برای کاربرد های حمل و نقل در حال پیشرفت است. شرکت های خودرو سازی برای فراهم کردن یک منبع انرژی سبک وزن و وابسته به سوخت

فسیلی برای خودرو های هایبرید الکتریکی به ویژه اتوبوسها، علاقه مند به استفاده از میکروتوربین ها هستند. میکروتوربین ها همچنین برای فراهم کردن انواع سوخت ها ساخته می شوند و برای برنامه های کاربردی گاز زباله دفن شده و بازیافت منبع، مورد استفاده قرار می گیرند (۲۸).

## بازیافت گرما

گرمای تلف شده از میکروتوربین عمدتاً به شکل گازهای خروجی داغ می باشند. این گرما برای تامین انرژی یک ژنراتور بخار، گرمایش یک ساختمان، اختصاص به ذخیره حرارت یا استفاده در سیستم سرمایش جذبی مناسب می باشد. اما بیشتر طرح ها یک ریکاپراتور را به کار می گیرند که مقدار گرمای موجود برای کاربرد های میکرو CHP را محدود می کند. روشی که در آن گرمای تلف شده می تواند مورد استفاده قرار بگیرد به پیکربندی سیستم توربین وابسته است. در یک توربین اصلاح نشده، گاز خروجی معمولاً دمایی بین ۱۱۰۰-۱۰۰۰ فارنهایت (۵۳۸-۵۹۴ درجه سانتیگراد) قرار دارد. یک توربین اصلاح شده می تواند گرمای تلف شده را برای گرمایش و عملیات در سیستم سردکننده جذبی در دماهای خروجی ۵۲۰ فارنهایت (۲۷۱ درجه سانتیگراد) فراهم کند. گرمای بازیافتی همچنین می تواند برای هدایت یک دستگاه رطوبت زدای خشک کن مورد استفاده قرار بگیرد. استفاده از گرمای بازیافتی روی انتخاب میکروتوربین با یک ریکاپراتور یا بدون آن تاثیر می گذارد (۲۸).

## مزایا و معایب

بهره برداری از یک میکروتوربین دارای چندین مزیت است. میکروتوربین ها بخش های متحرک کمتری نسبت به موتورهای IC دارند. تعداد کم بخش های متحرک و نیاز کم به روغن کاری اجازه می دهد که میکروتوربین ها فواصل نگهداری طولانی داشته باشند. علاوه بر آن میکروتوربین ها هزینه های عملیاتی پایین تری از لحاظ هزینه در کیلو وات برق تولید شده دارند. مزیت دیگر میکروتوربین ها سایز نسبتاً کوچک آنها برای مقدار توانی است که تولید می کنند. میکروتوربین ها همچنین سبک وزن هستند و انتشارات گازهای گلخانه ای نسبتاً پایینی دارند. یکی از مزیت های بالقوه میکروتوربین ها بهره گیری از انواع سوخت هاست که شامل سوخت ها یا بیوسوخت های زباله می باشد. به خاطر اینکه میکروتوربین ها مقدار زیادی از گازهای خروجی داغ و تمیز در مقایسه با ژنراتورهای پراکنده دیگر تولید می کنند میکروتوربین ها پتانسیل بالایی در کاربردهای تولید همزمان دارند. معایب عمده میکروتوربین ها این است که آنها بازده الکتریکی پایین تری دارند. همچنین با ارتفاع بالاتر و دماهای بالای محیط، میکروتوربین ها افت بازده و توان خروجی کاهش می یابد. دمای بالا به طور مستقیم روی دمای هوای جذب شده تاثیر می گذارد. یک سیکل توربین گازی باید هوای ورودی را فشرده کند و هرچقدر فشرده سازی بیشتر باشد، بازده بالاتر خواهد بود. یک عیب بالقوه دیگر این است که میکروتوربین ها اگر به طور مداوم کار کنند به تعمیر و نگهداری زیادتری نیاز دارند (۲۹).

**پیل های سوختی:** پیل های سوختی تولید کننده قدرت فشرده و بی صدا بوده و فاقد قطعات متحرک می باشد که هیدروژن و اکسیژن را برای تولید برق مصرف می کنند و همزمان می توانند گرما را برای کاربردهای متنوعی تولید نمایند. پیل های سوختی بازده الکتریکی بالایی در محدوده وسیعی از بازه ها دارند و به کارگیری آنها علاوه بر صرفه جویی منابع انرژی فسیلی میزان آلاینده ها و نیز گلزهای گلخانه ای را کاهش می دهد. یکی از معایب عمده پیل های سوختی هزینه اولیه بالای آنهاست. به خاطر طبیعت عملیاتی شان، پیل های سوختی خیلی کند عمل می کنند. این به پیل ها اجازه می دهد در نواحی مسکونی یا ساختمانی که آلودگی صوتی در آنها خیلی نا مطلوب است مورد استفاده قرار گیرند. متأسفانه مشکل اصلی پیل های سوختی قیمت بالای آنهاست (۲۲).

## **تجهیزات الکتریکی:**

تجهیزات الکتریکی برای سیستمهای تولید همزمان شامل ژنراتورهای برقی، رله ها، ترانسفورمرها، تجهیزات سوئیچینگ، قطع کننده مدارها کترهای برقی، کنترلها، خطوط انتقال و دیگر تجهیزات وابسته می باشد.

علاوه بر تجهیزاتی که در تولید قدرت برقی مورد نیاز است، سیستم های تولید همزمان ممکن است به تجهیزاتی برای اتصال، به سیستم شبکه نیاز داشته باشد تا هم برای استفاده به صورت قدرت اضطراری (پشتیبانی) و هم برای فروش نیروی برق به شبکه، مورد استفاده قرار بگیرد (۳۰).

## تجهیزات بازیابی حرارت :

تجهیزات بازیابی حرارت اولیه که در سیستم های تولید همزمان مورد استفاده قرار می گیرد، انواع تجهیزات تولید کننده بخار و آب گرم را شامل می شود. به علاوه چیلرهای جذبی را نیز در این قسمت میتوان در نظر گرفت. چندین نوع از تجهیزات بازیابی حرارت وجود دارد (۱۲). همانطور که قبلاً توضیح داده شد، این تجهیزات را می توان به نام تجهیزات HRSG یعنی تولید بخار از حرارت بازیابی شده نیز خواند که غالباً این تجهیزات به چند دسته تقسیم می شوند :

- بدون احتراق

- احتراق جزئی

- احتراق کامل

یک سیستم HRSG بدون احتراق همانا یک مبدل حرارتی کنوکسیون می باشد. یک سیستم HRSG با احتراق جزئی از یک کانال احتراق تشکیل شده که غالباً برای افزایش درجه حرارت گاز خروجی از یک مشعل گاز در بالا دست HRSG استفاده می شود. یک سیستم HRSG با احتراق کامل اساساً یک بویلر است که در آن از گاز خروجی به صورت هوای پیش گرم استفاده می کنند. در اکثر این تجهیزات، گاز خروجی از دستگاه عبور کرده و از بالای دستگاه خارج می شود. انرژی گاز خروجی برای گرم کردن و تبخیر آب و سوپر هیت کردن بخار مورد استفاده قرار می گیرد. انتخاب مناسب از تجهیزات HRSG بستگی به محرک اولیه، شرایط بخار مورد نیاز و دیگر پارامترهای وابسته دارد.

## چیلر های جذبی :

تفاوت عمده سیستم های CCHP با CHP اضافه شدن یک سیکل برای تأمین سرمایش است و در این زمینه مناسب ترین روش استفاده از سیستم هایی است که از گرمای اتلافی برای تأمین این نیاز استفاده می نمایند و بدین وسیله عملکرد CCHP تا حد قابل توجهی افزایش می یابد (۳۱، ۳۲). عمده ترین این تجهیزات، چیلرهای جذبی و جذب سطحی<sup>۱</sup> می باشند. این سیستم ها با گرمای بخار یا آب داغ آگروز حاصل از محرک های اولیه به حرکت در می آیند. همچنین چیلرهای تراکمی و چیلر های متحرک با موتورهای حرارتی نیز می توانند برای تأمین سرمایش در یک سیکل استفاده شوند (۳۱).

در چیلرهای جذبی می توان از انرژی حرارتی موجود در سیستم های تولید همزمان برای ایجاد سرمایش در محل استفاده کرد. در این قسمت بطور خلاصه عملکرد چیلرهای جذبی و کاربرد آنها برای سیستم های تولید همزمان تشریح خواهد شد. در چیلرهای جذبی از سیالات بخصوص و سیکل ترمودینامیکی مشخصی استفاده می شود که درجه حرارت های پائین را بدون نیاز به یک کمپرسور بخار که در چیلرهای مکانیکی وجود دارد ایجاد می کنند. یک چیلر جذبی به جای استفاده از کمپرسور بخار از پمپ های مایع و منابع با درجه حرارت پائین مثل آب گرم، بخار یا گاز دودکش استفاده می کند. در چیلرهای جذبی از سیالات محلولی استفاده می شود که از دو جزء تشکیل شده اند. اصول کلی عملکرد چیلر جذبی بر این اساس است که بعد از پمپ شدن محلول به فشار بالا، از انرژی با درجه

---

<sup>1</sup> Adsorption



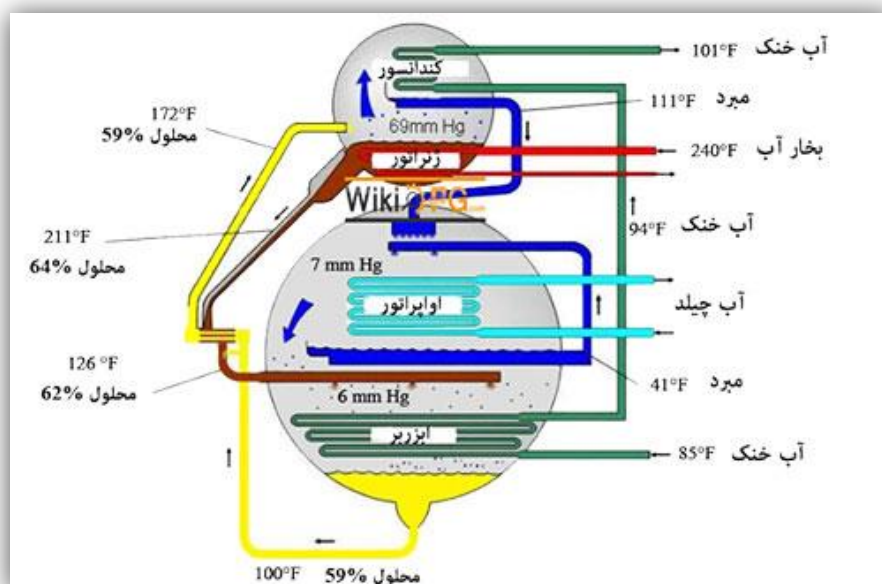
حرارت پائین برای تبخیر یک جزء محلول استفاده می شود. از این جزء به عنوان مبرد در این

سیکل استفاده می شود. نمونه هایی از محلول ها به شرح زیر می باشند :

- آب و آمونیاک

- لیتیوم بروماید و آب

- لیتیوم کلراید و آب



شکل ۲-۲- چرخه چیلر جذبی

در مورد اول آمونیاک به عنوان مبرد بوده و در دو مورد دیگر آب به عنوان مبرد مورد

استفاده قرار می گیرد. در کاربرد های تولید همزمان، ویژگی مهم چیلرهای جذبی آن است که

آنها از انرژی درجه حرارت نسبتاً پائین که بطور مستقیم و یا غیر مستقیم از محرک اولیه

بدست می آید، می توانند برای تولید آب سرد در سرمایش استفاده کنند. استفاده از چیلرهای جذبی بخصوص برای محل هایی که بارهای حرارتی آب و فضاها در مدت معینی از سال حداقل می باشند، مفید می باشد. برای این موارد، خروجی حرارتی یک سیستم تولید همزمان را می توان برای گرمایش در خلال فصل سردتر سال و با استفاده از چیلر جذبی برای سرمایش در خلال فصل گرمتر سال استفاده کرد. ضمن اینکه عدم استفاده از چیلرهای تراکمی، باعث ثابت تر شدن بارهای الکتریکی در خلال سال می شود. در آب و هواهای گرم، چیلرهای جذبی اگر نگوئیم که یکی از اجزاء ضروری است، یک جزء مهم از جهت تکنیکی و اقتصادی در موفقیت سیستم های تولید همزمان می باشد(۳۴).

## ۲-۳- مسائل مربوط به طراحی فنی:

### انتخاب نوع و اندازه محرک اولیه

انتخاب یک محرک اولیه برای یک سیستم تولید همزمان توجه به مسائل فنی و غیرفنی گوناگونی را می طلبد. مسائل فنی که غالباً در انتخاب فرآیند مطرح می شود، شامل:

حالت یا حالات عملکرد واحد مورد نظر و نسبت مورد نیاز حرارت به قدرت برای واحد مورد نظر، مقدار قدرت کلی و هرگونه مسائل خاص محلی مثل صدای کم و غیره می باشد. دیگر مسائل که در انتخاب فرآیند نقش دارند، استفاده از تجهیزات و مهارت پرسنل موجود در واحد می باشند. البته تصمیم گیری نهایی متأثر از مسائل اقتصادی می باشد. اگر سوخت انتخاب زغال سنگ یا دیگر سوختهای جامد باشد(۳۵)، معمولاً از توربینهای بخار و بویلرها در یک سیستم تولید همزمان استفاده می شود. گاهی برای سیستمهای که در بار پایه کار

می کنند، می توان از یک سیستم ۵۰ مگاوات خیلی بزرگ بزرگتر از توربین بخار با سوخت مایع یا گاز نیز استفاده کرد. همچنین از توربینهای بخار و بویلرها در زمانی که نسبت بالای حرارت به قدرت مورد نیاز است استفاده می شود.

از توربینهای گازی در بسیاری از سیستم های تولید همزمان که نسبت حرارت به قدرت مورد نیاز و قدرت الکتریکی مورد نیاز بالا باشد استفاده می شود. همچنین از توربینهای گاز در جاهایی که ارتعاش کم و نسبت وزن به قدرت پائین است (مثل حالتی که نصب بر روی سقف است) استفاده می شود.

موتورهای رفت و برگشتی در جایی که نسبت به قدرت نسبتاً کم است و نیز درجه حرارت انرژی حرارتی پائین است و بیشترین راندمان الکتریکی به دلایل اقتصادی مورد نیاز است استفاده می شود (۳۶).

بعلاوه موتورهای رفت و برگشتی را در واحدی بکار می گیرند که پرسنل مناسبتری از جهت راه اندازی و نگهداری این موتورها در آن واحد برای این کار وجود داشته باشند. انتخاب اندازه برای محرک اولیه می بایست مشخص کردن مناسب ترین حالت در مورد عملکرد اقتصادی تولید همزمان را شامل شود. سپس حالت های کارکرد گوناگون را در جهت برآورده شدن این نیازها می بایست در نظر گرفت. با انجام یک تجزیه و تحلیل اقتصادی همه جانبه، اقتصادی ترین حالت کارکرد و اندازه محرک اولیه را می توان تعیین کرد (۲۲).

## ۲-۴- ملاحظات زیست محیطی در سیستمهای تولید انرژی همزمان

یکی دیگر از دلایل گرایش به سیستم های تولید انرژی همزمان، آلاینده‌گی کمتر آن نسبت به دیگر سیستمهای تولید انرژی می باشد. بازیافت حرارت دفع شده از یک سو و همچنین صرفه جویی ناشی از عدم نیاز به یک مولد حرارتی دیگر نسبت به سیستمهای مجزا و همچنین استفاده از سوختهای تمیز، همچون گاز طبیعی و یا پیل سوختی سه عامل اساسی در کاهش آلاینده‌گی این سیستمها می باشد (۱۶).

## فصل سوم      مدل سازی سیستم

## توضیح مختصر در مورد شرکت داروسازی مهبان دارو

این شرکت واقع در شهر صنعتی کاوه در شهرستان ساوه می باشد که در ساختمانی متشکل از واحد های تولید، آزمایشگاه، انبار، تاسیسات و اداری در زمینه تولید داروهای جامد در یک شیفت کاری ۸ ساعته در روز مشغول به فعالیت می باشد. در حال حاضر نیاز سرمایشی و گرمایشی شرکت توسط روشهای قدیمی استفاده از مشعل شوفاژ تامین می گردد که ما در این پژوهش سعی بر آن داریم که سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش را با استفاده از نرم افزار ترموفلو برای تامین نیازهای این شرکت با استفاده از میکروتوربین گاز، مبدل حرارتی و چیلر جذبی مدلسازی نماییم و پس از بررسی سناریوهای مختلف، به شرایط بهینه دست یابیم.

## سیستم مدل شده و روابط حاکم بر آن

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد در سیستم مدل شده از یک میکروتوربین گازی برای تولید کار و تولید برق و از مبدل حرارتی و چیلر جذبی برای تولید حرارت و برودت با استفاده از گازهای داغ خروجی میکروتوربین استفاده می گردد. برای مدل کردن سیستم از ماژول ترموفلکس نرم افزار تخصصی ترموفلو استفاده شده است که نتایج و داده های مدلسازی و بررسی سناریو های مختلف در فصل بعد به طور کامل ارائه شده است. جهت یافتن اندازه بهینه میکروتوربین و چیلر مورد نظر، مصرف برق و گاز یک دوره ۱۲ ماهه شرکت مذکور را مورد بررسی قرار دادیم که حداکثر مصرف برق در دوره دوازده ماهه ۱۹۱ کیلووات و بار برودتی ساختمان ۲۳۸ کیلووات برآورد شد.

بارهای سرمایشی ساختمان ها اغلب توسط کولرهای آبی، گازی و یا چیلرهای جذبی تامین می شود. هر چند تامین سرمایش به حجم بارهای سرمایشی و نیز شرایط اقلیمی و موقعیت آب و هوایی منطقه مورد نظر وابستگی مستقیم دارد، ولیکن مطالعات نشان می دهد به کارگیری سیستم های جذبی به منظور تامین سرمایش در ساختمان از لحاظ اقتصادی به صرفه تر خواهد بود (۳).

تجهیزات سرمایشی متنوعی اعم از کولرهای آبی، کولرهای گازی به صورت عملکرد یگانه و اسپلیت و نیز چیلرهای تراکمی و جذبی جهت تامین بارهای سرمایشی در فصول گرم سال متداول است که همانطور که ذکر شد، انتخاب یک سیستم مناسب می بایست بر اساس حجم بارهای سرمایشی و نیز در نظر گرفتن اقلیم مورد نظر صورت پذیرد. به عنوان مثال می توان عنوان کرد که به کارگیری کولر آبی در اقلیم مرطوب توصیه نشده و کارآیی مناسبی نخواهد داشت و یا نصب چیلرهای تراکمی و جذبی برای تامین سرمایش یک ساختمان مسکونی کوچک به صرفه نبوده و توجیه اقتصادی ندارد. همانگونه که ذکر شد کولر آبی به دلیل هزینه اولیه نسبتاً کم و سهولت در نصب و بهره برداری یک از متداولترین سیستم های سرمایشی کشور ماست که ضمن تامین بارهای سرمایشی، رطوبت محیط را نیز افزایش داده و به همین دلیل در اقلیم گرم و خشک بسیار مناسب می باشد. با این وجود عدم کارآیی این تجهیزات در اقلیم مرطوب و نیز مصرف قابل توجه آب در آنها موجب شده تا به کارگیری چیلرهای تراکمی و جذبی رایج گردد. چیلرهای جذبی در مقایسه با نوع تراکمی از هزینه اولیه بالاتری برخوردارند در عوض هزینه انرژی مصرفی آنها به طور قابل ملاحظه ای پایین تر است. به این ترتیب که مصرف انرژی گرمایی به جای انرژی الکتریکی، در سیستم های جذبی

هزینه های مصرفی سیستم را به طرز چشمگیری کاهش می دهد. این گرمایش می تواند بصورت مستقیم از منابع سوخت فسیلی نظیر مشعل های گازی و یا از طریق بخار آب یا آب گرم تامین گردد (۳۱،۳۷).

بدین ترتیب می توان این گونه عنوان کرد که سیستم های جذبی از مزیت نسبی در هزینه های مصرف انرژی برخوردار بوده و در صورتی که انرژی گرمایی مورد نیاز به صورت فراوان و ارزان در دسترس باشد این مزیت دو چندان می گردد. به خاطر اینکه گازهای خروجی یا مایعات فرایند نمی توانند به طور مستقیم در بسیاری از کاربردها مورد استفاده قرار بگیرند، مبدل های گرمایی برای تسهیل انتقال انرژی حرارتی اتلافی به کاربردهای بازیافت گرما به کار می روند (۲۹). برای بازیافت گرما و تولید حرارت در فصل زمستان، با بررسی انواع مبدل ها و شرایط سیستم و موقعیت منطقه، مبدل پوسته لوله انتخاب گردید.

در سیستم های تولید همزمان، گرمای گازهای خروجی از مولد تولید الکتریسیته که می تواند موتور احتراق داخلی و یا یک توربین گازی باشد، در یک بازیاب کننده حرارت موسوم به مولد بخار بازیاب (HRSG) به آب منتقل شده و تولید آب گرم یا بخار آب می کند. بدین ترتیب گرمای اتلافی سیستم به انرژی گرمایی مفید به صورت آبگرم یا بخار آب تبدیل می شود. این انرژی گرمایی مفید می تواند بصورت مستقیم برای تامین گرمایش در ساختمان استفاده شده و یا چنانچه توضیح داده شد جهت تامین نیازهای سرمایشی به عنوان انرژی مورد نیاز چیلر جذبی به کار گرفته شود (۷).



توربین گازی شامل یک کمپرسور جریان محوری یک محفظه احتراق حلقوی و یک توربین انبساط دهنده جریان محوری می باشد. در سیستم ارائه شده ابتدا هوای خشک وارد کمپرسور می شود. هوا پس از فشرده شدن در کمپرسور به سمت محفظه احتراق جریان می یابد. توربین گازی از گاز طبیعی با آنالیز مشخص به عنوان سوخت بهره می برد. پس از احتراق گاز طبیعی با هوای خشک، به واسطه گرما زا بودن واکنش سوختن، حرارت بسیار زیادی در محفظه احتراق شکل می گیرد که موجب افزایش انرژی جنبشی گازهای دودکش خروجی از آن می گردد. گاز دودکش با حرارت بسیار زیاد به فضای توربین منبسط کننده جریان می یابد و سبب به حرکت درآوردن پره های میکروتوربین می گردد. با به حرکت در آمدن توربین منبسط کننده در واقع انرژی جنبشی موجود در گازهای دودکش به انرژی مکانیکی (گشتاور) تبدیل گشته است (۳۸).

میکروتوربین گازی دو خروجی خواهد داشت که یکی انرژی مکانیکی (گشتاور) تولیدی و دیگری گازهای دودکش خروجی از آگزوز آن می باشد. با متصل کردن یک ژنراتور تولید برق به محور میکروتوربین گازی، از انرژی مکانیکی تولید شده برای تولید برق استفاده می گردد. همچنین می توان از انرژی مکانیکی تولید شده برای به گردش درآوردن یک کمپرسور جهت فشرده سازی یک ماده گازی شکل و یا به حرکت درآوردن یک پمپ جهت بالا بردن فشار یک مایع نیز استفاده نمود (۳۹).

علی رغم اینکه عمده انرژی جنبشی موجود در گازهای دودکش محفظه احتراق توسط میکروتوربین منبسط کننده به انرژی مکانیکی تبدیل گشته است اما هنوز حرارت بسیار زیادی

دارد. در صورتی که بازیافت حرارت از گاز دودکش خروجی از میکروتوربین گازی صورت نگیرد تمامی انرژی موجود در آن به اتمسفر تخلیه می گردد و علاوه بر هدر رفتن مقادیر زیادی از انرژی، مشکلات زیست محیطی نیز به دنبال خواهد داشت. به منظور جلوگیری از آن، حرارت موجود در گازهای دودکش میکروتوربین گازی با استفاده از بویلرهای بازیافت حرارت و یا مبدل‌های حرارتی تبدیل به آب داغ یا بخار می گردد تا برای مصارف سرمایشی و گرمایشی مورد استفاده قرار گیرد (۴۰).

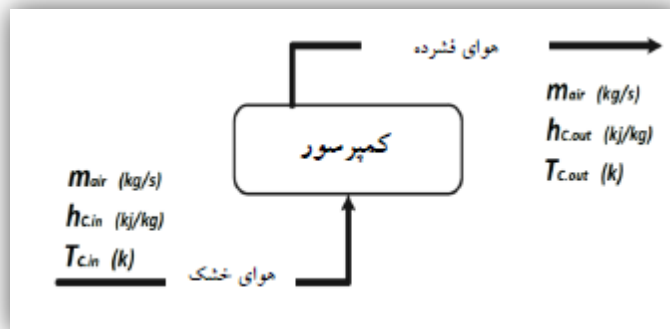
در صورتی که امکان بازیافت حرارت موجود در گازهای دودکش موجود نباشد می بایست از یک بویلر که به صورت مجزا از گاز طبیعی به عنوان سوخت استفاده می کند برای تولید آب داغ و بخار بهره جست.

## **مدلسازی میکروتوربین گازی**

هر میکروتوربین گازی بر اساس سیکل برایتون ولی با متغیرهای متفاوت کار می کند. تعداد مراحل و یا آرایش آن می تواند تغییر کند ولی همواره مراحل افزایش فشار، احتراق (افزایش گرما) و در انتها انبساط سیال (گاز دودکش داغ و فشرده) به دنبال هم و به صورت همسان در تمامی میکروتوربینها موجب تولید قدرت می شود. این مجموعه ممکن است ابتدا کمی پیچیده به نظر برسد ولی با تشریح موارد مربوطه تمامی رفتار آن مشخص خواهد شد (۳۹).

## مدلسازی کمپرسور

در سیکل برایتون یکی از فرایندهای اساسی، افزایش فشار سیال عامل است که توسط کمپرسور انجام می شود. به عبارت دیگر از آنجا که سیال عبوری از توربین منبسط می شود نسبت فشاری مورد نیاز می بایست تامین گردد که این کار معمولاً توسط کمپرسور صورت می گیرد (۴۱). نحوه جریان انرژی هوا در شکل زیر نمایش داده شده است:



شکل ۳-۱- جریان انرژی هوا در کمپرسور

## کار مصرفی کمپرسور در حالت ایده آل

کمپرسور برای فشرده کردن هوا نیاز به استفاده از انرژی مکانیکی (کار) خواهد داشت که توسط محور متصل به میکروتوربین منبسط کننده تامین می گردد. بهره وری کمپرسور در عملکرد کلی میکروتوربین گاز بسیار تاثیرگذار است چراکه ۵۵ تا ۶۱ درصد از توان تولیدی

توربین توسط کمپرسور مصرف می گردد. کار مصرفی کمپرسور با توجه به مقدار هوایی که فشرده می سازد توسط اختلاف آنتالپی جریان جرمی هوا در مقطع ورودی و مقطع تخلیه به دست می آید (۴۱):

$$W'_C = \dot{m}_{air}(h'_{Cout} - h_{Cin}) \quad (۱-۳)$$

جایی که  $h_{Cin}$  آنتالپی هوای ورودی به کمپرسور،  $h'_{Cout}$  آنتالپی هوای خروجی از کمپرسور در حالت آل ایده است و  $\dot{m}_{air}$  دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور است.

## دما و آنتالپی هوای ورودی به کمپرسور

میکروتوربین های گازی ماشین هایی هستند که مستقیماً از هوای آزاد تنفس می کنند. لذا هر عملی که باعث تغییر در شرایط هوای ورودی به آنها گردد موجب تغییر عملکرد میکروتوربین خواهد شد. یکی از آن عوامل دمای هوای ورودی به کمپرسور می باشد. هوای ورودی به کمپرسور با توجه به دمایی که خواهد داشت دارای انرژی اولیه (آنتالپی) می باشد. با توجه به تعریف آنتالپی فرمول زیر برای آن وجود دارد:

$$h = C_p T \quad (۲-۳)$$

از فرمول کلی آنتالپی، مقدار آنتالپی هوای ورودی به کمپرسور نیز از فرمول زیر قابل

محاسبه می باشد:

$$h_{c.in} = C_{P.air} T_{C.in} \quad (3-3)$$

که  $C_{P.air}$  ظرفیت گرمایی ویژه هوا و  $T_{C.in}$  دمای هوای ورودی به کمپرسور می باشد.

از آنجا که کمپرسور یک توربوماشین است عملکرد آن را می توان به صورت آدیاباتیک در

نظر گرفت، حالت ایده آل عملکرد کمپرسور، حالت آیزنتروپیک است (۴۲).

## دما و آنتالپی خروجی از کمپرسور

زمانی که هوا توسط کمپرسور فشرده می شود، علاوه بر افزایش فشار شاهد افزایش

دمای هوا نیز خواهیم بود به عبارتی افزایش فشار برابر است با افزایش دما. با افزایش دمای

هوا، آنتالپی آن نیز افزایش خواهد یافت. با در نظر گرفتن آدیاباتیک بودن فرآیند فشرده سازی

هوا، آنتالپی هوای خروجی از کمپرسور نیز از فرمول زیر محاسبه می گردد (۴۲):

$$h'_{c.out} = h_{c.in} r p^{(k-1)/k} \quad (4-3)$$

که  $\Gamma_p$  در آن نسبت تراکم کمپرسور و  $k$  نسبت گرمای ویژه می باشد. لازم به ذکر است آنتالپی به دست آمده در شرایط ایده آل می باشد. آنتالپی واقعی هوای خروجی از کمپرسور را می توان با در نظر گرفتن بازدهی کمپرسور از فرمول زیر محاسبه نمود (۴۲):

$$h_{c.out} = (h'_{c.out} - h'_{c.in})/\eta_c + h_{c.in} \quad (۵-۳)$$

آنتالپی هوای ورودی به کمپرسور در حالت ایده آل  $h'_{c.in}$  و در حالت واقعی  $h_{c.in}$  باهم برابر است. در فرمول بالا  $\eta_c$  راندمان کمپرسور می باشد. همچنین با به دست آوردن مقدار واقعی آنتالپی هوای خروجی از کمپرسور و با استفاده از فرمول (۵-۳) و مقدار ظرفیت گرمایی ویژه هوا، دمای هوای خروجی از کمپرسور قابل محاسبه می باشد.

### کار مصرفی کمپرسور در حالت واقعی

با به دست آمدن مقدار واقعی آنتالپی هوای خروجی از کمپرسور، می توان مقدار کار مصرفی کمپرسور در حالت واقعی را نیز به دست آورد.

$$W_c = \dot{m}_{air} (h_{c.out} - h_{c.in}) \quad (۶-۳)$$

## مدلسازی محفظه احتراق

بعد از راه اندازی میکروتوربین گاز اگر کل سیستم را به حالت خود رها کنیم (بدون اینکه سوختی مصرف کنیم) قاعدتاً باید قدرت تولید شده در میکروتوربین مساوی قدرت مصرف شده در کمپرسور باشد. اما این از لحاظ علمی غیرممکن است. در میکروتوربین گاز مقداری از قدرت تولید شده در میکروتوربین صرف به گردش آوردن کمپرسور شده و مابقی آن به عنوان کار خروجی جهت تولید برق (یا هر مصرف دیگر) مصرف می شود. بنابراین لازم است که قدرت تولیدی در میکروتوربین بیشتر از قدرت مصرفی در کمپرسور باشد. برای این منظور می توان با اضافه کردن حجم سیال عامل در فشار ثابت یا افزایش فشار آن در حجم ثابت قدرت تولیدی میکروتوربین را افزایش داد (۴۳).

هر یک از دو روش فوق را می توان با بالا بردن دمای سیال عامل پس از متراکم ساختن آن به کار برد. برای افزایش دمای سیال عامل یک محفظه احتراق لازم است تا با احتراق سوخت دمای هوا بالا رود. در میکروتوربینهای گازی چند نکته مهم در طراحی سیستم احتراق در نظر گرفته می شود به جز بعضی کاربردهای خاص فضای احتراق نسبتاً کوچک و توزیع حرارت هوای خروجی از اتاقک احتراق تا حد امکان یک دست است تا کارایی خوبی داشته باشد همچنین جهت جلوگیری از ایجاد حرارت نقطه های اضافه، میبایستی احتراق مستمر و پایدار باشد و اگر فرآیند احتراق کامل نباشد موجب تشکیل ذرات کربنی می شود (۴۳).

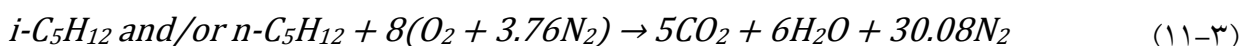
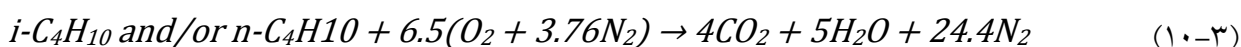
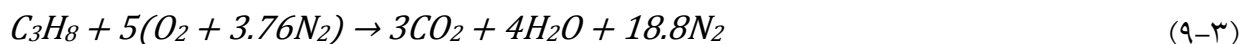
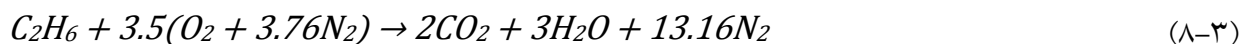
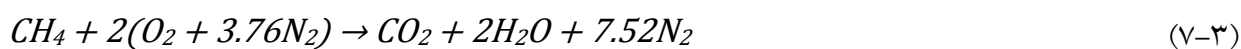
هدف از احتراق هوا افزودن انرژی حرارتی در هوا بوسیله افزودن درجه حرارت آن است باید به این نکته توجه کرد که افزایش درجه حرارت ورودی به توربین (خروجی اتاق احتراق) عموماً با افزایش فشار خروجی کمپرسور همراه است و حد نهایی فشار مقداری است که کمپرسور توانایی تامین آن را دارد. در اتاق احتراق انرژی شیمیایی به افزایش آنتالپی هوا تبدیل می شود (۴۴).

## فرآیند احتراق

فرآیندی که طی آن مقداری از سوخت، اکسید شده و انرژی زیادی آزاد می شود را احتراق می گویند. اکسید کننده‌های که اغلب در فرآیند احتراق استفاده می شود، هوا می باشد (به دلیل ارزانی و قابل دسترس بودن). اکسیژن خالص را به دلیل گران قیمت بودن، تنها در بعضی از فرآیندهای خاص استفاده می کنند. در یک مول یا یک حجم خاص از هوای خشک، ۴٫۲۱ درصد اکسیژن، ۱٫۷۸ درصد نیتروژن، ۴٫۱ درصد آرگون و مقادیر ناچیزی دی اکسیدکربن، هلیوم، نئون و هیدروژن وجود دارد. از آنجا که در فرآیند احتراق، آرگون شبیه نیتروژن عمل می کند، ترکیب هوا را به صورت ۲۱ درصد اکسیژن و ۷۴ درصد نیتروژن، توسط اعداد مولی در نظر می گیرند. لذا با ورود هوا، به ازای هر مول اکسیژن، ۷۶٫۳ مول نیتروژن وارد می شود. سوخت مصرفی در محفظه احتراق، گاز طبیعی با ترکیبات مشخص می باشد. با فرض اینکه احتراق در فشار ثابت صورت می گیرد و هوای ورودی به محفظه احتراق،



هوای خشک شامل  $N_2$  و  $O_2$  می باشد و نیتروژن در واکنش شرکت نمی کند واکنش های احتراقی ایده آل فرض می شوند پس فرآیند سوختن هیدروکربنها تنها دی اکسید کربن و بخار آب تولید می کند و هیدروکربن نسوخته یا مونوکسید کربن تولید نمی کند و با در نظر گرفتن اینکه دما و فشار هوا از تحلیل کمپرسور به دست آمده است، می توان معادلات شیمیایی احتراق سوخت را به صورت زیر ارائه نمود (۴۵، ۴۱):



واکنشهای انجام شده گرمازا می باشند و انرژی آزاد شده سبب افزایش آنتالپی گاز دودکش ورودی به توربین منبسط کننده خواهد شد. اگر تمام کربن موجود در سوخت به  $CO_2$  و تمام هیدروژن آن به  $H_2O$  اکسید شود فرآیند احتراق، کامل نامیده می شود و اگر محصولات احتراق شامل سوخت نسوخته یا موادی از قبیل  $C$ ،  $CO$  و  $OH$  باشد، فرآیند احتراق ناقص نامیده می شود. اکسیژن به ترکیب با هیدروژن نسبت به کربن تمایل بیشتری

دارد. بنابراین معمول هیدروژن درون سوخت به طور کامل می سوزد حتی اگر مقدار اکسیژن کمی کمتر از مقدار مورد نیاز برای احتراق کامل سوخت باشد (۴۵).

## **مقدار هوای تئوری یا استوکیومتریک**

کمترین مقدار هوای مورد نیاز برای احتراق کامل یک سوخت هوای تئوری یا استوکیومتریک نامیده می شود. بنابراین وقتی احتراق کامل با هوای تئوری صورت گیرد محصولات حاوی اکسیژن نخواهند بود. در عمل در صورتی احتراق کامل رخ می دهد که هوای تزریق شده به سیستم بیشتر از هوای تئوری باشد، معمولاً مقدار هوای به کار رفته بر حسب درصد هوای تئوری بیان می گردد. به عبارتی ۱۵۰ درصد هوای تزریقی به معنی آن است که هوای به کار رفته ۱/۵ برابر هوای تئوری است و به هوای به کار رفته مازاد بر هوای تئوری، هوای اضافی گفته می شود.

## **ارزش سوخت حرارتی**

ارزش حرارتی سوخت یکی از پرکاربردترین اصطلاحات در احتراق سوختها می باشد که برابر با قدر مطلق آنتالپی احتراق سوخت ( $h_c$ ) است.

$$HeatingValue = \frac{hC}{\text{}} \quad (12-3)$$

ارزش حرارتی سوخت به فاز آب موجود در محصولات احتراق وابسته است. اگر آب موجود در محصولات احتراق به صورت مایع باشد ارزش حرارتی سوخت را ارزش بالا (HHV) می نامند و اگر آب موجود در محصولات احتراق به صورت بخار باشد، ارزش حرارتی سوخت را ارزش حرارتی پایین (LHV) می نامند (۴۱).

### دبی جرمی محصولات احتراق (دبی گاز دودکش)

حجم سوخت تزریق شده به محفظه احتراق اینک بخشی از گاز دودکش ورودی به توربین منبسط کننده خواهد بود. به عبارت دیگر دبی جرمی ورودی به توربین منبسط کننده ( $\dot{m}_{mix}$  یا  $T_{in}$ ) برابر با مجموع دبیهای جرمی هوای ورودی به کمپرسور ( $\dot{m}_{air}$ ) و سوخت تزریقی به محفظه احتراق (NG) خواهد بود.

$$T_{in} = \dot{m}_{air} + NG\dot{m} \quad (13-3)$$

## بالانس حرارتی در محفظه احتراق

برای محاسبه مقدار انرژی تولید شده از احتراق، (آنتالپی خروجی) در محفظه احتراق می بایست از بالانس انرژی در اتاقک استفاده نمود. با فرض آدیاباتیک بودن محفظه احتراق و اینکه راندمان آن صد در صد می باشد موازنه انرژی برای این بخش از توربین گازی به صورت شکل زیر خواهد بود.



شکل ۳-۲- جریان انرژی محفظه احتراق

در این حالت جریان انرژی ورودی به اتاقک برابر با جریان انرژی خروجی از آن می باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\dot{m}T_{in} hT_{in} = \dot{m}_{air} h_{c,out} + (NG.LHV) \quad (۱۴-۳)$$

در این صورت مقدار آنتالپی خروجی از محفظه احتراق و یا آنتالپی ورودی به توربین منبسط کننده از فرمول قابل محاسبه است :

$$\frac{hT.in}{\dot{m}T.in} = (\dot{m}_{air} h_{C.out} + (NG.LHV)) / \quad (3-15)$$

در این موازنه،  $\dot{m}T.in$  و  $hT.in$  به ترتیب دبی جرمی و آنتالپی گاز دودکش در قسمت ورودی توربین بوده که با دبی جرمی و دمای خروجی از محفظه احتراق برابر می باشند NG و LHV نیز به ترتیب، دبی جرمی گاز طبیعی ورودی به محفظه و ارزش حرارتی پایین آن می باشند. با جایگذاری مقدار واقعی آنتالپی خروجی از کمپرسور در این فرمول، می توان آنتالپی در قسمت ورودی توربین  $hT.in$  را به دست آورد. بالطبع با جایگذاری مقدار ایده آل آنتالپی خروجی از کمپرسور در فرمول، مقدار ایده آل آن در قسمت ورودی توربین قابل حصول است (۴۳).

## ظرفیت گرمایی ویژه گاز دودکش

گرمای ویژه در فشار ثابت نیز عبارت است از:

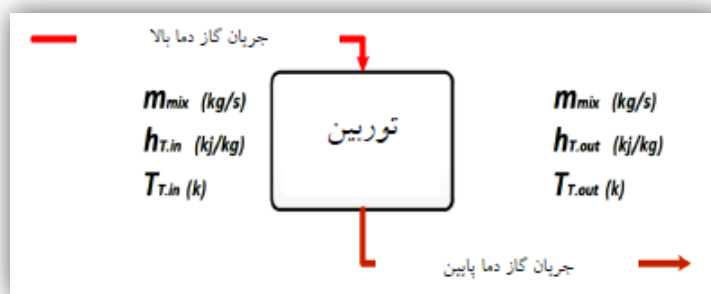
$$C_{P.mix} = \sum X_i C_{P.i} \quad (3-16)$$

با در اختیار داشتن گرمای ویژه هریک از گازهای خروج  $C_{p,i}$  از محفظه احتراق، می توان گرمای ویژه گاز دودکش خروجی از محفظه را محاسبه نمود. در فرمول فوق  $X_i$  کسر مولی گازهای خروجی از محفظه احتراق می باشد.

## مدلسازی میکروتوربین منبسط کننده

شکل زیر نحوه ورود و خروج جریان انرژی را از میکروتوربین منبسط کننده نمایش می

دهد:



شکل ۳-۳- جریان ورود و خروج انرژی از توربین

## کار ایده آل تولیدی میکروتوربین

گازهای دودکش دما بالا که از محفظه احتراق خارج می گردد به میکروتوربین راه می یابد و باعث به حرکت درآمدن پره های میکروتوربین می گردد که در نتیجه با گشتاور ایجاد شده کار تولید می شود. فرض می شود که انبساط گاز فشرده و داغ در توربین، به صورت

آدیاباتیک رخ می دهد. از اختلاف آنتالپی ایده آل جریان جرمی گاز دودکش در قسمت ورودی و خروجی میکروتوربین مقدار کار ایده آل تولیدی قابل محاسبه خواهد بود.

$$W'_T = \dot{m}_{T.in} (h'_{T.in} - h'_{T.out}) \quad (17-3)$$

### دما و آنتالپی خروجی از میکروتوربین در شرایط ایده آل

توربین در شرایط آدیاباتیک کار می کند؛ دمای خروجی از میکروتوربین در شرایط ایده آل  $T'_{T.out}$  وابسته به مقادیر دمای هوای ورودی  $T'_{T.in}$  و نسبت گرمای ویژه  $k$  می باشد. بنابراین دمای خروجی از میکروتوربین در شرایط ایده آل را می توان از فرمول زیر محاسبه نمود:

$$T'_{T.out} = T'_{T.in} / r_p^{(k-1)/k} \quad (18-3)$$

جایی که  $T'_{T.in}$  دمای ورودی به میکروتوربین در شرایط ایده آل می باشد و با توجه به مقدار  $h'_{T.in}$  طبق فرمول (3-5) به دست آمده است.

با به دست آمدن مقدار دمای ایده آل خروجی از میکروتوربین می توان مقدار آنتالپی ایده آل خروجی از میکروتوربین را با استفاده از فرمول شماره (3-5) محاسبه نمود.

## دما و آنتالپی خروجی از میکروتوربین در شرایط واقعی

در شرایط واقعی به دلیل وجود عواملی همچون اصطکاک، مقدار کار تولیدی میکروتوربین کمتر از حالت ایده‌آل می باشد. با توجه به تعریف راندمان آیزنتروپیک میکروتوربین  $\eta_T$  می توان مقدار آنتالپی خروجی از میکروتوربین را در شرایط واقعی محاسبه نمود و سپس با استفاده از آن مقدار دمای واقعی خروجی از میکروتوربین قابل محاسبه خواهد بود.

$$h'_{T.out} = h'_{T.in} - \eta_T (h'_{T.in} - h'_{T.out}) \quad (۱۹-۳)$$

## کار واقعی تولیدی میکروتوربین گازی

مقدار کاری که میکروتوربین گازی در حالت واقعی تولید می کند با توجه به مقادیر واقعی جریان های انرژی ورودی و خروجی از آن قابل محاسبه می باشد. با محاسبه مقدار واقعی آنتالپی خروجی از میکروتوربین، مقدار کاری که در میکروتوربین در حالت واقعی تولید می شود از فرمول زیر قابل محاسبه می باشد (۴۵):

$$W'_T = \dot{m}_{T.in} (h'_{T.in} - h'_{T.out}) \quad (۲۰-۳)$$



## بار حرارتی اجزای سیکل چیلر جذبی

با نوشتن معادله بقای انرژی برای ژنراتور، ابزوربر و کندانسور به راحتی می توان بار حرارتی ژنراتور، ابزوربر و کندانسور را بدست آورده، پس از آن با جمع کردن بارهای ابزوربر و کندانسور بار برج خنک کننده را به دست آورد (۴۶):

$$\dot{m}_{cooling\ tower} = Q_{cooling\ tower} / C_P (T_{out} - T_{in}) \quad (۲۱-۳)$$

با به دست آمدن دبی برج خنک کننده حتی می توان دمای آب خنک کن ورودی به کندانسور را بدست آورد:

$$Q_{cond} = \dot{m}_{cooling\ tower} \times C_P (T_{out,cond} - T_{in,cond}) \quad (۲۲-۳)$$

با توجه به تناژ دستگاه ( $Q_{evap}$ ) و فرمول زیر می توان دبی آب چیلد را بدست آورد:

$$\dot{m}_{chilled} = Q_{evap} / C_P (T_{out} - T_{in}) \quad (۲۳-۳)$$

دبی بخار مصرفی را نیز می توان با رابطه زیر به دست آورد:

$$\dot{m}_{steam} = Q_{gen} / h_{fg\ steam} \quad (۲۴-۳)$$

که در آن  $h_{fg \text{ steam}}$  در فشار بخار ورودی لحاظ می شود. حال می توان به راحتی COP

دستگاه را به دست آورد:

$$COP = Q_{evap} / Q_{gen} + \Sigma W_{pump} \quad (25-3)$$

## فصل چهارم

## شبه سازی سیستم

این سیستم بر اساس چندین سناریو الکتریکال و ترمال مدلسازی شده است که در سناریوهای الکتریکال، برق مصرفی شرکت که به طور میانگین در یک دوره یکساله تخمین زده شده است مبنی قرار گرفته است و میزان بخار تولیدی برآورد شده است. در سناریوی ترمال نیاز حرارتی شرکت که به صورت دست بالا در نظر گرفته شده، مبنی مدلسازی قرار گرفته است که در ادامه با ارائه نتایج حاصل از سناریوهای مختلف به بحث و تجزیه تحلیل آنها می پردازیم.

اساس عملکرد سیستم بر این روال است که هوا (جریان شماره ۴) قبل از ورود به کمپرسور بوسیله آب سرد خروجی از چیلر (جریان شماره ۲۱) خنک شده و سپس وارد کمپرسور می شود (جریان شماره ۱۸) و پس از فشرده سازی، وارد محفظه احتراق میکروتوربین گازی می گردد و پس از اختلاط با سوخت (جریان گاز شماره ۵) و تولید انرژی مکانیکی و به حرکت درآوردن ژنراتور و تولید برق، به صورت گاز داغ از میکروتوربین خارج می گردد (جریان شماره ۴). گاز داغ خروجی از میکروتوربین از اواپراتور<sup>۱</sup> عبور کرده و بخار خروجی از چیلر (جریان شماره ۷) را گرم می کند و سپس راهی اگزاست می گردد (جریان شماره ۱). بخار گرم خروجی چیلر پس از افزایش دما در اواپراتور (جریان بخار شماره ۵) به همراه آب میک آپ<sup>۲</sup> مجدداً وارد چیلر گشته و این چرخه تکرار می گردد. در چیلر نیز آب چیلد واتر<sup>۳</sup> طی سیکل چیلر، توسط جاذب و بخار گرم خنک می گردد و به مصرف ساختمان می رسد (جریان شماره ۱۳) و بخشی از آب سرد تولیدی چیلر، جهت خنک نمودن هوای

---

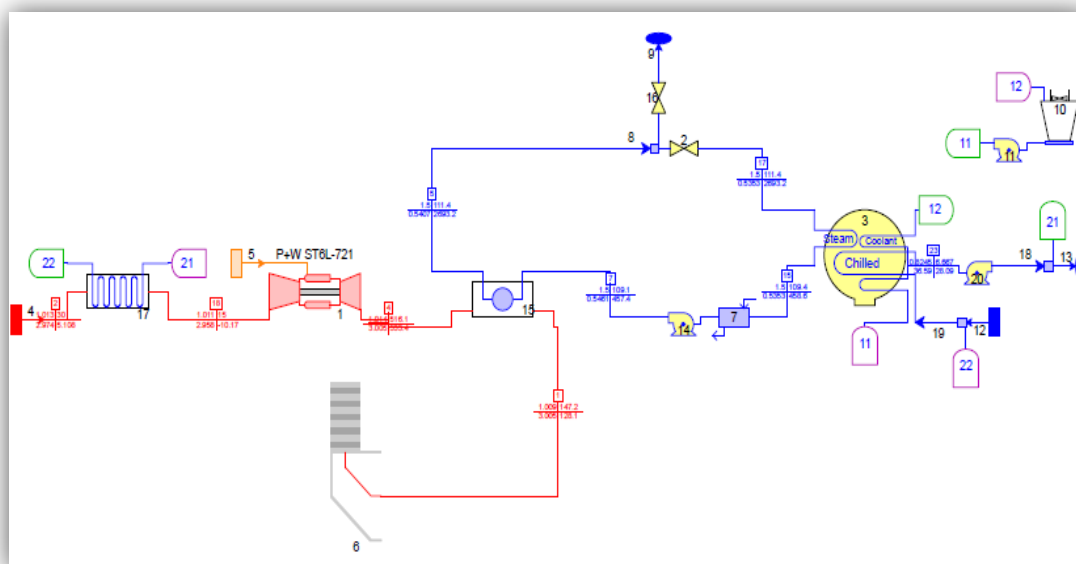
<sup>1</sup> Evaporator

<sup>2</sup> Make up Water

<sup>3</sup> Chilled Water

ورودی کمپرسور، به مصرف مبدل می رسد( جریان شماره ۲۱). لازم به ذکر است در مسیر بخار داغ خروجی از اواپراتور( جریان بخار شماره ۵) قبل از ورود به چیلر یک تقسیم کننده جریان قرار داده ایم تا بخشی از بخار گرم مصرفی ساختمان چه در فصل تابستان جهت نیاز بخار واحد تولید و همچنین نیاز آب گرم و چه در فصل زمستان جهت تامین نیاز گرمایشی، توسط شیر کنترل شماره ۱۶ از جریان جدا گردد و مابقی جریان توسط شیر کنترل شماره ۲ به سمت چیلر هدایت گردد( جریان شماره ۱۷).

شماتیک سیستم مدل شده به شرح ذیل می باشد:



شکل (۴-۱)- شماتیک سیستم CCHP مدل شده

در مدلسازی انجام شده سوخت میکروتوربین، گاز طبیعی در نظر گرفته شده است. آنالیز گاز طبیعی ورودی به محفظه احتراق در جدول ذیل داده شده است:

جدول (۱-۴) – آنالیز سوخت ورودی به محفظه احتراق

اجزاء	درصد مولی	واحد
$H_2$	۰.۳۶	%
$O_2$	۰.۰۷	%
$N_2$	۳.۶۵	%
$CO$	۰.۰۹	%
$CO_2$	۰.۳۴	%
$CH_4$	۸۷	%
$C_2H_6$	۸.۴۶	%
$C_2H_4$	۰.۰۳	%
جمع	۱۰۰	%
ارزش حرارتی پایین	۴۶۲۸۰.۲۲	کیلوژول/کیلوگرم
ارزش حرارتی بالا	۵۱۲۳۷.۱۶	کیلوژول/کیلوگرم
وزن مولکولی	۱۷.۷۴	–

مشخصات سوخت ورودی در سناریوی اول و چهار سناریوی بعد به محفظه احتراق به شرح

ذیل می باشد:

جدول (۲-۴) – مشخصات سوخت ورودی به محفظه احتراق در سناریوی اول

سوخت ورودی به محفظه احتراق در سناریو اول	فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)	آنالپی (کیلوژول/کیلوگرم)
	۳۴.۴۷	۲۵	۰.۰۱۶	۴۶۲۸۰.۲۲

جدول (۳-۴) - مشخصات سوخت ورودی به محفظه احتراق در سناریو های دوم تا پنجم

سوخت ورودی به محفظه احتراق	فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)
در سناریو های دوم تا پنجم	۳۴.۴۷	۲۵	۰.۰۴۷	۴۶۲۸۰.۲۲

سناریوی اول:

حداکثر ظرفیت میکروتوربین: ۲۰۰ کیلو وات

حداکثر ظرفیت چیلر: ۳۵ تن معادل ۱۲۲ کیلو وات

حالت اول:

با فرض اینکه در فصل تابستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای

شهرستان ساوه ۳۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با فرض اینکه کل بخار تولیدی

توسط میکروتوربین به مصرف چیلر برسد، نتایج ذیل حاصل گشت:

جدول (۴-۴) - مشخصات هوای ورودی به کمپرسور

هوای ورودی به کمپرسور	فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)
	۱.۰۱۳۲	۳۵	۱.۳۱۳	۱۰.۲۶	۱.۱۶۱

جدول (۵-۴) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین

هوای خروجی از توربین	فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)
	۱.۰۴۰	۲۸۳.۴	۱.۳۲۹	۲۷۹.۴	۲.۱۲۳

جدول (۶-۴) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگزااست

دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی به اگزااست
۱.۴۹۵	۹۲.۴۴	۱۱۸.۶	۱.۰۰۹	

جدول (۷-۴) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگزااست

اجزاء	درصد مولی	واحد
$O_2$	۱۶.۲۹۴	%
$N_2$	۷۵.۱۷۹	%
$CO_2$	۲.۰۸۸	%
$Ar$	۰.۹۱۲	%
$H_2O$	۴.۹۲۷	%

جدول (۸-۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر

آنالیز (کیلوگرم/ثانیه)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲۶۹۳.۱۹	۰.۱۰۴	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۸
۲۶۹۳.۱۹	۰.۰۰۰	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۱۶
۲۶۹۳.۱۹	۰.۱۰۳	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۲



جدول (۹-۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر بعد از چیلر

فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنالتیسی (کیلوژول/کیلوگرم)	
۰.۱۲۴۵	۶.۶۶۷	۴.۲۷۷	۲۸.۰۹	جریان ۱۸
۰.۳۲۴۰	۶.۶۶۷	۴.۲۷۷	۲۸.۰۹	جریان ۱۳
۱.۸۵۹	۶.۶۷۵	۰.۰۰۰	۲۸.۰۹	جریان ۲۱

جدول (۱۰-۴) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۱۸۹.۷ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۲۰۰ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۴۰۱۰ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	۱۲۰.۲ تن - ۳۳.۲۹ کیلووات
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	۱۸۹ تن - ۵۳.۲ کیلووات
بازده کلی سیستم	۵۵.۹ %

### حالت دوم:

در این حالت با فرضیات حالت قبل با این تفاوت که مقداری از دبی آب تولیدی توسط

چیلر صرف خنک نمودن هوای ورودی به کمپرسور گردد نتایج ذیل حاصل شد:

جدول (۱۱-۴) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنالیزی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۱.۱۶۱	۱۰.۲۶	۱.۳۱۳	۳۵	۱.۰۱۳۲	هوای ورودی
۱.۱۶۱	۱۰.۲۶	۱.۳۱۳	۲۵	۱.۰۱۰۷	هوای خروجی
-	۲۸.۲۳	۱.۷۹۵	۶.۶۷۵	۱.۸۵۹	آب ورودی
-	۴۹.۱۶	۱.۷۹۵	۱۱.۶۸	۱.۵۱۴	آب خروجی

جدول (۱۲-۴) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنالیزی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی از توربین
۲.۱۱۰	۲۷۴.۶	۱.۳۲۹	۲۸۱.۲	۱.۰۱۰۴	

جدول (۱۳-۴) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگزاست

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنالیزی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی به اگزاست
۱.۴۹۵	۹۲.۴۴	۱.۳۲۹	۱۱۹.۵	۱.۰۰۹۰	

جدول (۱۴-۴) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگزاست

اجزاء	درصد مولی	واحد
O <sub>2</sub>	۱۶.۲۹۴	%
N <sub>2</sub>	۷۵.۷۷۹	%
CO <sub>2</sub>	۲.۰۸۱	%
Ar	۰.۹۱۲	%
H <sub>2</sub> O	۴.۹۲۷	%

جدول (۴-۱۵) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر قبل از چیلر

انتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲۶۹۳.۱۹	۰.۱۰۴	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۸
۲۶۹۳.۱۹	۰.۰۰۰	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۱۶
۲۶۹۳.۱۹	۰.۱۰۴	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۲

جدول (۴-۱۶) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر بعد از چیلر

انتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲۸.۰۹	۴.۳۱۵	۶.۶۶۷	۰.۱۲۴۵	جریان ۱۸
۲۸.۰۹	۳.۰۰۲	۶.۶۶۷	۰.۳۲۴۰	جریان ۱۳
۲۸.۰۹	۱.۳۱۳	۶.۶۷۵	۱.۸۵۹	جریان ۲۱

جدول (۴-۱۷) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۲۱۰.۳ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۲۰۰ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۳۹۵۴ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	۱۲۰ تن - ۳۴.۰۲ کیلووات
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	۱۸۲ تن - ۵۲.۷ کیلووات
بازده کلی سیستم	۷۱٪

#### حالت سوم:

با فرض اینکه در فصل زمستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای شهرستان ساوه ۱۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با توجه به این موضوع که در این فصل چیلر و مبدل از سیستم خارج می شوند و کل بخار داغ تولیدی جهت گرمایش و مصارف دیگر تحویل ساختمان می گردد، نتایج ذیل حاصل گشت:

جدول (۴-۱۸) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر

فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)
جریان ۸	۱۱۱.۴	۰.۱۰۰	۲۶۹۳.۱۹
جریان ۱۶	۱۱۱.۴	۰.۱۰۰	۲۶۹۳.۱۹
جریان ۲	۱۱۱.۴	۰.۰۰۰	۲۶۹۳.۱۹

جدول (۴-۱۹) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۲۱۵.۶ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۲۰۰ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۳۵۲۹ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	-
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	-
بازده کلی سیستم	۷۰.۸۲٪

با توجه به نتایج بدست آمده از حالات بالا می توان به این نتیجه دست یافت که چیلر های با ظرفیت کمتر از این مورد، قادر به تامین نیاز سرمایشی ساختمان نیستند. لذا از بررسی حالات دیگر شامل میکروتوربین ۲۰۰ کیلو وات و چیلر های با ظرفیت کمتر خودداری می نمایم.

#### سناریوی دوم:

حداکثر ظرفیت میکروتوربین: ۴۸۰ کیلو وات

حداکثر ظرفیت چیلر: ۲۳۴ تن معادل ۸۲۲ کیلو وات

#### حالت اول:

با فرض اینکه در فصل تابستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای شهرستان ساوه ۳۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با فرض اینکه کل بخار تولیدی توسط میکروتوربین به مصرف چیلر برسد، نتایج ذیل حاصل گشت.

جدول (۴-۲۰) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲.۶۴۳	۱۰.۲۶	۲.۹۹۰	۳۵	۱.۰۱۳۲	هوای ورودی
۲.۹۵۱	۱۰.۱۷-	۲.۹۵۱	۱۵	۱.۰۱۰۷	هوای خروجی
-	۲۸.۲۳	۶.۶۳۸	۶.۶۷۵	۱.۸۵۹	آب ورودی
-	۴۹.۱۶	۶.۶۳۸	۱۱.۶۸	۱.۵۱۴	آب خروجی

جدول (۴-۲۱) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی از توربین
۶.۸۳	۵۳۳.۳۹	۳.۰۰۵	۵۱۶.۱	۱.۰۱۴۰	

جدول (۴-۲۲) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگزاست

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی به اگزاست
۳.۶۵۵	۱۲۸.۰۷	۳.۰۰۵	۱۴۷.۲	۱.۰۰۹۰	

جدول (۴-۲۳) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگزاست

واحد	درصد مولی	اجزاء
%	۱۶.۲۹۴	O <sub>2</sub>
%	۷۵.۷۷۹	N <sub>2</sub>
%	۲.۰۸۱	CO <sub>2</sub>
%	۰.۹۱۲	Ar
%	۴.۹۲۷	H <sub>2</sub> O

جدول (۴-۲۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر قبل از چیلر

فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	
۱.۵۰۰	۱۱۱.۴	۰.۵۴۱	۲۶۹۳.۱۹	جریان ۸
۱.۵۰۰	۱۱۱.۴	۰.۰۰۰	۲۶۹۳.۱۹	جریان ۱۶
۱.۵۰۰	۱۱۱.۴	۰.۵۴۱	۲۶۹۳.۱۹	جریان ۲

جدول (۴-۲۵) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر بعد از چیلر

فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	
۱.۸۵۹	۶.۶۷۵	۳۴.۹۷	۲۸.۲۳	جریان ۱۸
۰.۳۲۴۰	۶.۷۱۱	۲۸.۳۳	۲۸.۲۳	جریان ۱۳
۱.۸۵۹	۶.۶۷۵	۶.۶۳۸	۲۸.۲۳	جریان ۲۱

جدول (۴-۲۶) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۵۰۶.۶ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۴۷۳.۶ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۶۵۱۳ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	۷۷۵.۵ تن - ۲۳۰.۴ کیلووات
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	۸۶۲ تن - ۲۴۵.۵ کیلووات
بازده کلی سیستم	٪۷۶.۱۶

### حالت دوم:

با فرض اینکه در فصل زمستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای شهرستان ساوه ۱۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با توجه به این موضوع که در این فصل چیلر و مبدل از سیستم خارج می شوند و کل بخار داغ تولیدی جهت گرمایش و مصارف دیگر تحویل ساختمان می گردد، نتایج ذیل حاصل گشت:

جدول (۴-۲۷) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر

فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	
۱.۵۰۰	۱۱۱.۴	۰.۵۲۶	۲۶۹۳.۱۹	جریان ۸
۱.۵۰۰	۱۱۱.۴	۰.۵۲۶	۲۶۹۳.۱۹	جریان ۱۶
۱.۵۰۰	۱۱۱.۴	۰.۰۰۰	۲۶۹۳.۱۹	جریان ۲

جدول (۴-۲۸) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۵۰۶.۴ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۴۷۳.۴ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۶۴۹۵ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	-
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	-
بازده کلی سیستم	٪۷۷.۲۲



سناریوی سوم:

حداکثر ظرفیت میکروتوربین: ۴۸۰ کیلو وات

حداکثر ظرفیت چیلر: ۸۵ تن معادل ۳۰۰ کیلو وات

حالت اول:

با فرض اینکه در فصل تابستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای شهرستان ساوه ۳۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با فرض اینکه کل بخار تولیدی توسط میکروتوربین به مصرف چیلر برسد، نتایج ذیل حاصل گشت.

جدول (۴-۲۹) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲.۶۴۳	۱۰.۲۶	۲.۹۹۰	۳۵	۱.۰۱۳۲	هوای ورودی
۲.۴۳۶	-۱۰.۱۷	۲.۹۵۸	۱۵	۱.۰۱۰۷	هوای خروجی
-	۲۸.۲۳	۶.۶۳۸	۶.۶۷۵	۱.۸۵۹	آب ورودی
-	۴۹.۱۶	۶.۶۳۸	۱۱.۶۸	۱.۵۱۴	آب خروجی

جدول (۴-۳۰) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی از توربین
۶.۸۳	۵۳۳.۳۹	۳.۰۰۵	۵۱۶.۱	۱.۰۱۴۰	

جدول (۴-۳۱) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگزااست

دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی به اگزااست
۳.۶۵۵	۱۲۸.۰۷	۳.۰۰۵	۱.۰۰۹	۱۴۷.۲

جدول (۴-۳۲) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگزااست

واحد	درصد مولی	اجزاء
%	۱۶.۲۹۴	O <sub>2</sub>
%	۷۵.۱۷۹	N <sub>2</sub>
%	۲.۰۸۱	CO <sub>2</sub>
%	۰.۹۱۲	Ar
%	۴.۹۲۷	H <sub>2</sub> O

جدول (۴-۳۳) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلتر قبل از چیلر

آنالیز (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲۶۹۳.۱۹	۵۳۲.	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۸
۲۶۹۳.۱۹	۰.۳۱۹	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۱۶
۲۶۹۳.۱۹	۰.۲۱۳	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۲

جدول (۴-۳۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر بعد از چیلر

فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	
۱.۸۵۹	۶.۶۷۵	۱۳.۸۸	۲۸.۲۳	جریان ۱۸
۰.۳۲۴۰	۶.۷۱۱	۷.۲۴۵	۲۸.۲۳	جریان ۱۳
۱.۸۵۹	۶.۶۷۵	۶.۶۳۸	۲۸.۲۳	جریان ۲۱

جدول (۴-۳۵) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۵۰۶.۶ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۴۷۳.۶ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۶۵۱۳ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	۹۵.۷ تن - ۳۳۶.۴ کیلووات
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	۸۵ تن - ۳۰۲.۵ کیلووات
بازده کلی سیستم	٪۷۶.۲۹

#### حالت دوم:

با فرض اینکه در فصل زمستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای شهرستان ساوه ۱۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با توجه به این موضوع که در این فصل چیلر و مبدل از سیستم خارج می شوند و کل بخار داغ تولیدی جهت گرمایش و مصارف دیگر تحویل ساختمان می گردد، نتایج ذیل حاصل گشت:

جدول (۴-۳۶) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر

انتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲۶۹۳.۱۹	۰.۵۲۶	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۸
۲۶۹۳.۱۹	۰.۵۲۶	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۱۶
۲۶۹۳.۱۹	۰.۰۰۰	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۲

جدول (۴-۳۷) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۵۰۶.۴ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۴۷۳.۴ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۶۴۹۵ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	-
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	-
بازده کلی سیستم	٪۷۷.۲۲

سناریوی چهارم:

حداکثر ظرفیت میکروتوربین: ۴۸۰ کیلو وات

حداکثر ظرفیت چیلر: ۷۰ تن معادل ۲۵۰ کیلو وات

حالت اول:

با فرض اینکه در فصل تابستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای

شهرستان ساوه ۳۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با فرض اینکه کل بخار تولیدی

توسط میکروتوربین به مصرف چیلر برسد، نتایج ذیل حاصل گشت.

جدول (۴-۳۸) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنالیزی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲.۵۶۴	۱۰.۲۶	۲.۹۰۰	۳۵	۱.۰۱۳۲	هوای ورودی
۲.۴۲	-۵.۱۰	۲.۸۸۱	۲۰	۱.۰۱۰۷	هوای خروجی
-	۲۸.۲۳	۴.۳۶۲	۶.۶۷۵	۱.۸۵۹	آب ورودی
-	۴۹.۱۶	۴.۳۶۲	۱۱.۶۸	۱.۵۱۴	آب خروجی

جدول (۴-۳۹) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنالیزی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی از توربین
۶.۶۹	۵۳۹.۴۹	۲.۹۲۷	۵۱۹.۹	۱.۰۱۴۰	

جدول (۴-۴۰) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگزاست

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنالیزی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی به اگزاست
۳.۵۶۸	۱۲۸.۴۸	۲.۹۲۷	۱۴۷.۲	۱.۰۰۹۰	

جدول (۴-۴۱) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگزاست

اجزاء	درصد مولی	واحد
O <sub>2</sub>	۱۶.۲۹۴	%
N <sub>2</sub>	۷۵.۷۷۹	%
CO <sub>2</sub>	۲.۰۸۱	%
Ar	۰.۹۱۲	%
H <sub>2</sub> O	۴.۹۲۷	%

جدول (۴-۴۲) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر

انتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲۶۹۳.۱۹	۰.۵۲۴	۱.۵۰۰	۱.۵۰۰	جریان ۸
۲۶۹۳.۱۹	۰.۵۲۴	۱.۵۰۰	۱.۵۰۰	جریان ۱۶
۲۶۹۳.۱۹	۰.۵۲۴	۱.۵۰۰	۱.۵۰۰	جریان ۲

جدول (۴-۴۳) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر بعد از چیلر

انتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲۸.۲۳	۱۰.۱۹	۶.۶۷۵	۱.۸۵۹	جریان ۱۸
۲۸.۲۳	۵.۸۲۵	۶.۷۱۱	۰.۳۲۴۰	جریان ۱۳
۲۸.۲۳	۴.۳۶۲	۶.۶۷۵	۱.۸۵۹	جریان ۲۱

جدول (۴-۴۴) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۴۸۴.۵ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۴۵۲.۲ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۶۷۹۷ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	۷۰.۵ تن - ۲۴۷.۶ کیلووات
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	۶۳ تن - ۲۲۲.۶ کیلووات
بازده کلی سیستم	٪۷۷.۱۳

## حالت دوم:

با فرض اینکه در فصل زمستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای شهرستان ساوه ۱۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با توجه به این موضوع که در این فصل چیلر و مبدل از سیستم خارج می شوند و کل بخار داغ تولیدی جهت گرمایش و مصارف دیگر تحویل ساختمان می گردد، نتایج ذیل حاصل گشت:

جدول (۴-۴۵) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر

فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنالتی (کیلوژول/کیلوگرم)
جریان ۸	۱۱۱.۴	۰.۵۲۰	۲۶۹۳.۱۹
جریان ۱۶	۱۱۱.۴	۰.۵۲۰	۲۶۹۳.۱۹
جریان ۲	۱۱۱.۴	۰.۰۰۰	۲۶۹۳.۱۹

جدول (۴-۴۶) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۴۱۵.۴ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۴۵۲.۲ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۶۷۹۷ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	-
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	-
بازده کلی سیستم	٪۷۷.۲۲

## سناریوی پنجم:

حداکثر ظرفیت میکروتوربین: ۴۸۰ کیلو وات

حداکثر ظرفیت چیلر: ۵۵ تن معادل ۲۰۰ کیلو وات

حالت اول:

با فرض اینکه در فصل تابستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای شهرستان ساوه ۳۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با فرض اینکه کل بخار تولیدی توسط میکروتوربین به مصرف چیلر برسد، نتایج ذیل حاصل گشت.

جدول (۴-۴۷) - مشخصات جریانات ورودی و خروجی مبدل

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲.۴۸۲	۱۰.۲۶	۲.۸۰۷	۳۵	۱.۰۱۳۲	هوای ورودی
۲.۴۰۲	۰.۰۰	۲.۸۰۳	۲۵	۱.۰۱۰۷	هوای خروجی
-	۲۸.۲۳	۱.۷۹۵	۶.۶۷۵	۱.۸۵۹	آب ورودی
-	۴۹.۱۶	۱.۷۹۵	۱۱.۶۸	۱.۵۱۴	آب خروجی

جدول (۴-۴۸) - مشخصات هوای خروجی از میکروتوربین

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی از توربین
۶.۵۷۱	۵۴۶.۵۴	۲.۸۴۸	۵۲۳.۹	۱.۰۱۴۰	



جدول (۴-۴۹) - مشخصات هوای خروجی به سمت اگزاست

دبی حجمی (مترمکعب/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	هوای خروجی به اگزاست
۳.۴۸۲	۱۲۹.۰۲	۲.۸۴۸	۱۴۷.۲	۱.۰۰۹۰	

جدول (۴-۵۰) - آنالیز هوای خروجی به سمت اگزاست

واحد	درصد مولی	اجزاء
%	۱۶.۲۹۴	O <sub>2</sub>
%	۷۵.۷۷۹	N <sub>2</sub>
%	۲.۰۸۸	CO <sub>2</sub>
%	۰.۹۱۲	Ar
%	۴.۹۲۷	H <sub>2</sub> O

جدول (۴-۵۱) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر

آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	دما (سانتیگراد)	فشار (بار)	
۲۶۹۳.۱۹	۰.۵۱۷	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۸
۲۶۹۳.۱۹	۰.۳۸۸	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۱۶
۲۶۹۳.۱۹	۰.۱۲۹	۱۱۱.۴	۱.۵۰۰	جریان ۲

جدول (۴-۵۲) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر بعد از چیلر

فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)	
۱.۸۵۹	۶.۶۷۵	۸.۴۰۲	۲۸.۲۳	جریان ۱۸
۰.۳۲۴۰	۶.۷۱۱	۶.۶۰۷	۲۸.۲۳	جریان ۱۳
۱.۸۵۹	۶.۶۷۵	۱.۷۹۵	۲۸.۲۳	جریان ۲۱

جدول (۴-۵۳) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۴۶۳.۲ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۴۳۱.۶ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۷۱۰۶ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	۵۸.۹ تن - ۲۰۷ کیلووات
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	۵۲.۹ تن - ۱۸۶ کیلووات
بازده کلی سیستم	٪۷۷.۷۰

#### حالت دوم:

با فرض اینکه در فصل زمستان به سر می بریم و در این فصل میانگین دمای هوای شهرستان ساوه ۱۵ درجه سانتیگراد تخمین زده شده است، و با توجه به این موضوع که در این فصل چیلر و مبدل از سیستم خارج می شوند و کل بخار داغ تولیدی جهت گرمایش و مصارف دیگر تحویل ساختمان می گردد، نتایج ذیل حاصل گشت:

جدول (۴-۵۴) - مشخصات جریان های عبوری از اسپیلیتر قبل از چیلر

فشار (بار)	دما (سانتیگراد)	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)	آنالتیسی (کیلوژول/کیلوگرم)	
۱.۵۰۰	۱۱۱.۴	۰.۵۱۴	۲۶۹۳.۱۹	جریان ۸
۱.۵۰۰	۱۱۱.۴	۰.۵۱۴	۲۶۹۳.۱۹	جریان ۱۶
۱.۵۰۰	۱۱۱.۴	۰.۰۰۰	۲۶۹۳.۱۹	جریان ۲

جدول (۴-۵۵) - بازده خروجی سیستم

مجموع نیروی شفت میکروتوربین	۴۶۳.۲ کیلووات
مجموع انرژی الکتریکی تولیدی	۴۳۱.۶ کیلووات
ارزش حرارتی پایین سوخت	۱۷۱۰۶ کیلوژول/کیلووات ساعت
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط استاندارد	-
مجموع ظرفیت اسمی چیلر در شرایط کنونی	-
بازده کلی سیستم	٪۷۷.۱۱

## فصل پنجم

## جمع بندی

## نتایج:

امروزه تولید همزمان را می توان به کمک روش ها و فن آوری های گسترده و متنوعی پیاده سازی کرد. اما ایده ی اصلی همواره یکسان است: طراحی و ساخت یک سیستم مجتمع پربازده به منظور تولید انرژی الکتریکی در کنار بازیافت حرارت تولید شده در سیستم، که حرارت بازیافتی می تواند در سرمایش و گرمایش ناحیه ای و یا در فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد (۴۷).

در عصر حاضر که بحران انرژی و هزینه های سنگین تامین آن و همچنین افزایش شدید آلاینده های زیست محیطی چالش جدی و مهمی را پیش روی تمامی کشورها قرار داده است، بهره گیری از راه کار تولید همزمان به عنوان یک روش تولید انرژی ارزان و پاک، گامی موثر در جهت کاهش هزینه ها و مدیریت صحیح منابع انرژی پیش روی ما قرار داده است (۴۸).

از طرفی توجیه اقتصادی راه اندازی نیروگاه های تولید همزمان این فرصت را به سرمایه گذاران بخش خصوصی می دهد که حتی فارغ از دغدغه های مربوط به بحران انرژی و یا گسترش آلاینده های زیست محیطی و صرفا به منظور کسب درآمد، فرصت یک سرمایه گذاری امن، مطمئن و پربازده را در صنعت تولید انرژی کشور در اختیار داشته باشند (۴۸).

در فصل قبل به بررسی سناریوهای مختلفی پرداختیم که هرکدام با توجه به شرایط خاص بررسی و نتایج آنها ارائه گشت. جدول زیر خلاصه ای از نتایج سناریو های مختلف را

نشان می‌دهد که در این فصل با بررسی هر یک از سناریو ها و همچنین با توجه به شرایط

شرکت مورد مطالعه و برآورد هزینه های اقتصادی، به انتخاب سناریو برتر می پردازیم.

جدول (۱-۵) - خلاصه داده های سناریوهای بررسی شده

ظرفیت میکروتوربین (کیلووات)	ظرفیت چیلر (تن)	راندمان کل سیستم %	برق تولیدی (کیلووات)	انرژی حرارتی تولیدی (کیلووات)
۲۰۰	۳۵	۷۱.۲۴	۱۹۳	۲۳۰
۴۱۰	۲۳۴	۷۶.۷۰	۴۴۵	۱۲۰۹
۴۱۰	۱۵	۷۶.۷۲	۴۶۱	۱۲۰۱
۴۱۰	۷۰	۷۷.۴۰	۴۴۰	۱۱۹۳
۴۱۰	۵۵	۷۷.۱۰	۴۲۰	۱۱۸۱

در جدول ذیل نیز خلاصه ای از هزینه تجهیزاتی مثل توربین و چیلر و همچنین هزینه

سوخت مصرفی و انرژی الکتریکی و بخار تولیدی در هر سناریو، جهت بررسی و انتخاب بهتر

سناریو بهینه ارائه می گردد:

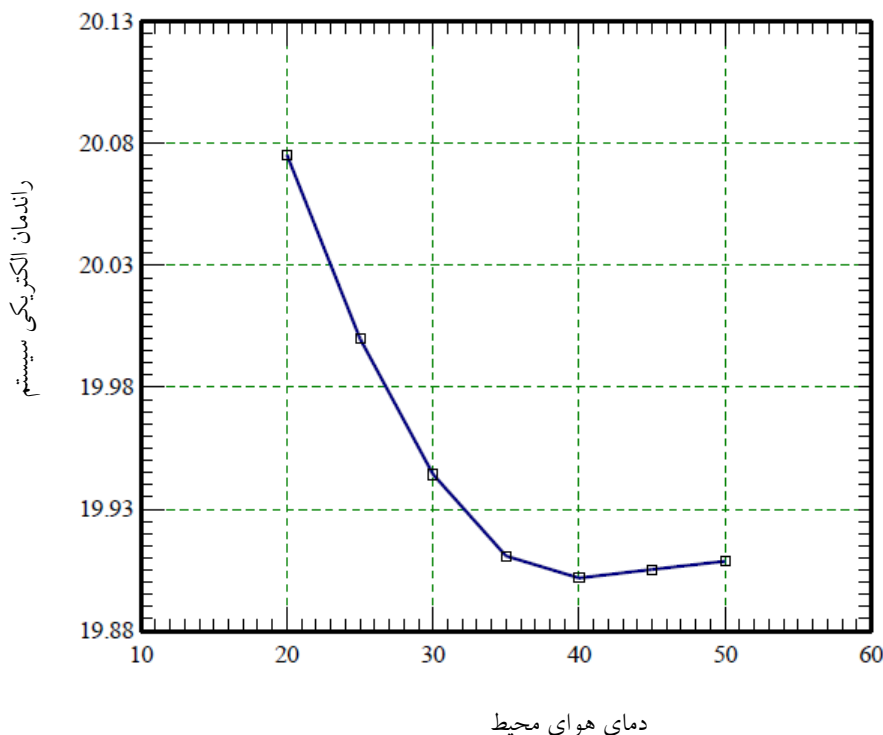
جدول (۲-۵) - خلاصه هزینه های میکروتوربین و چیلر

سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم	سناریو پنجم
۲۴۷۴۱۳	۴۸۱۳۰۰	۴۸۱۳۰۰	۴۸۱۳۰۰	۴۸۱۳۰۰
۱۴۴.۷۷۸	۴۵۶۴۸۳	۲۸۳۱۵۵	۲۳۷۶۲۹	۲۰۹۸۲۲

نمودار زیر راندمان الکتریکی (تولید برق) سیستم را به نسبت دمای هوای محیط به ما

نشان می دهد. همانطور که در شکل نیز مشخص است با افزایش دمای هوای محیط تولید

انرژی الکتریکی سیستم به شدت کاهش پیدا میکند. لازم به ذکر است که راندمان کل سیستم از مجموع راندمانهای انرژی الکتریکی و سرمایشی و گرمایشی محاسبه می گردد که در نمودار ذیل تنها تغییرات راندمان الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته شده است.



شکل (۵-۱) - تغییرات راندمان الکتریکی نسبت به دمای محیط

همانطور که در فصول پیش نیز اشاره شد، نیاز الکتریکی شرکت ۱۹۱ کیلو وات و نیاز برودتی ۲۳۸ کیلو وات برآورد گشت. حال با استفاده از نتایج فصل قبل و همچنین با در نظر گرفتن موقعیت و شرایط شرکت مورد مطالعه، به بررسی سناریو های ارائه شده می پردازیم.

در سناریوی اول میکروتوربین قادر به تامین نیاز الکتریکی شرکت می باشد اما با توجه به نتایج ارائه شده، مقدار بخار داغ تولیدی قادر به تامین نیاز سرمایشی و گرمایشی شرکت نمی باشد و از آنجا که یکی از اهداف اصلی ما در این پروژه تامین نیاز سرمایشی شرکت با استفاده از سیستم تولید همزمان می باشد، به کار گیری این سناریو توصیه نمی گردد. لازم به

ذکر است که هزینه نسبتاً پایین چیلر و میکروتوربین در این سناریو از مزایای این طرح می باشد ولی با توجه به خواسته ها و شرایط موجود، این طرح قابل اجرا نمی باشد.

در سناریوی دوم میکروتوربین و به تبع چیلر جذبی بزرگتری انتخاب شده است که هزینه بیشتری را هم در بر دارد اما توربین علاوه بر اینکه می تواند نیاز الکتریکی شرکت را به نحو احسن تامین نماید، قادر است مقداری مازاد نیز تولید کند که با توجه به موقعیت جغرافیایی مناسب این شرکت و اینکه صاحبان این شرکت و شرکت همسایه یکی می باشند، می توان این مقدار را به مصرف شرکت همسایه اختصاص داد. ظرفیت چیلر در این سناریو بسیار بزرگ می باشد به طوری که حدوداً قادر به تامین سه برابر نیاز سرمایشی شرکت است که از لحاظ اقتصادی به هیچ وجه مقرون به صرفه نمی باشد.

در سناریو سوم ظرفیت میکروتوربین همانند سناریوی قبل انتخاب شده که به راحتی قادر به تامین نیاز الکتریکی شرکت می باشد. و اما چیلر با ظرفیت کمتر انتخاب گشته که علاوه بر هزینه مناسب تر، به راحتی می تواند نیاز سرمایشی و گرمایشی همچنین بخار و آب گرم شرکت را برطرف سازد. در این سناریو جریان سرد تولیدی چیلر با عبور از مبدل قادر خواهد بود در فصول گرم سال، دمای هوای ورودی به کمپرسور را تا ۱۵ درجه سانتیگراد کاهش دهد که باعث افزایش عمر میکروتوربین می گردد. با توجه به موقعیت جغرافیایی شرکت و اینکه درجه هوا در روزهای گرم در شهرستان ساوه به ۴۵ درجه سانتیگراد نیز می رسد، استفاده از این طرح توصیه می گردد به علاوه اینکه در صورتی که انرژی حرارتی تولیدی مازاد نیاز شرکت باشد و با توجه به مصرف بالای تولید شرکت همسایه مذکور، می



توان مقدار بخار مازاد تولید را در اختیار ایشان قرار داد. لازم به ذکر است که راندمان سیستم در این حالت نسبت به حالات دیگر بالاتر می باشد.

در سناریو چهارم نیز شرایط میکروتوربین همانند دو سناریو پیشین انتخاب شده ولی ظرفیت چیلر محدود تر گشته به طوری که علاوه بر تامین نیاز گرمایشی و سرمایشی ساختمان، قادر کاهش درجه حرارت محیط در حدود ۲۰ درجه سانتیگراد می باشد. سیستم از راندمان نسبتاً خوبی برخوردار است اما توجه به این نکته ضروری است که دمای حدود ۲۰ درجه سانتیگراد میتواند به مرور زمان باعث کاهش عمر مفید و کارایی میکروتوربین گردد.

در آخرین سناریوی بررسی شده نیز شرایط میکروتوربین و انرژی الکتریکی همانند سناریو پیشین است و اختلاف آن با حالات قبل در اندازه چیلر جذبی می باشد. این چیلر نیز قادر به تامین نیاز سرمایشی و بخار داغ تولیدی سیستم قادر به رفع نیاز گرمایشی مجموعه می باشد اما دبی آب سرد خروجی چیلر محدود به کاهش درجه حرارت هوای ورودی به ۲۵ درجه سانتیگراد می باشد که باعث کاهش راندمان میکروتوربین می گردد. همچنین مقدار بسیار زیادی از انرژی حرارتی به صورت بخار داغ تولید گشته که مازاد مصرف می باشد و می توان با انتخاب چیلر جذبی بزرگتر، با کاهش بیشتر دمای هوای ورودی به کمپرسور، باعث افزایش راندمان و عمر مفید میکروتوربین شد.

در نهایت پس از بررسی حالات مختلف، سناریو سوم و چهارم به عنوان سناریو های بهینه انتخاب و به سرمایه گذاران طرح اعلام می گردد که هیئت مدیره و سرمایه گذاران با بررسی های هزینه و برآورد بازگشت سرمایه طرح، می توانند طرح نهایی را انتخاب نمایند.

## فهرست مراجع:

- 1- Breeze, P., Chapter 4 - Natural Gas-fired Gas Turbines and Combined Cycle Power Plants, in Power Generation Technologies (Second Edition), P. Breeze, Editor. 2014, Newnes: Boston. p. 67-91.
- 2- Petchers N. Combined heating, cooling & power handbook: Technologies & applications: An integrated approach to energy resource optimization: The Fairmont Press, Inc.; 2003.
- 3- E. Cardon, A. Piacentin, "Optimal design of CCHP plants in the civil sector by thermoeconomic", Applied Energy 84 (2007) 729-748.
- 4- Fumo N, Chamra LM. Analysis of combined cooling, heating, and power systems based on source primary energy consumption. Applied Energy. 2010;87(6):2023-30.
- 5- S, Li, J.Y, Wu, " Theoretical research of a silica gel-water adsorption chiller in a micro combined cooling, heating and power (CCHP) system" Applied Energy 86(2009) 958-967.
- 6- El-Khattam W, Salama M. Distributed generation technologies, definitions and benefits. Electric power systems research. 2004;71(2):119-28.
- ۷- س. کریمی علویجه، ک. رضاپور، ر. کرمی، ۱۳۹۳ " به کارگیری چیلر جذبی در سیستم تولید همزمان سرما، گرما و الکتریسیته (CCHP)", نخستین همایش بین المللی چیلر و برج خنک کن در ایران
- 8- Martínez-Lera, S. and J. Ballester, A novel method for the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems for buildings. Energy, 2010. 35(7): p. 2972-2984.
- 9- Liu, M., Y. Shi, and F. Fang, Combined cooling, heating and power systems: A survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. 35: p. 1-22.

- 10- Golušin, M., S. Dodić, and S. Popov, Chapter 1 - Introduction, in Sustainable Energy Management, M. Golušin, S. Dodić, and S. Popov, Editors. 2013, Academic Press: Boston. p. 1-6.
  
- 11- Vallero, D., Chapter 29 - Air Pollutant Emissions, in Fundamentals of Air Pollution (Fifth Edition), D. Vallero, Editor. 2014, Academic Press: Boston. p. 787-827.
  
- 12- Onar, O.C. and A. Khaligh, Chapter 2 - Energy Sources, in Alternative Energy in Power Electronics, M.H. Rashid, Editor. 2015, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 81-154.
  
- 13- Moradi H, Moghaddam I, Moghaddam M, Haghifam M-R, editors. Opportunities to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions for a cogeneration plant. Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010 IEEE International; 2010: IEEE.
  
- 14- Carbon dioxide information analysis center. Available from: [http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/CSVFILES/global.1751\\_2010.csv](http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/CSVFILES/global.1751_2010.csv).
  
- 15- Ebrahimi, M. and A. Keshavarz, 10 - CCHP the Future, in Combined Cooling, Heating and Power, M.E. Keshavarz, Editor. 2015, Elsevier: Boston. p. 197-200.
  
- 16- Jabbari, B., et al., Design and optimization of CCHP system incorporated into kraft process, using Pinch Analysis with pressure drop consideration. Applied Thermal Engineering, 2013. 61(1): p. 88-97.
  
- 17- Krishna, K.S. and K.S. Kumar, A review on hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. 52: p. 907-916.

- 18- Papavinasam, S., Chapter 1 - The Oil and Gas Industry, in Corrosion Control in the Oil and Gas Industry, S. Papavinasam, Editor. 2014, Gulf Professional Publishing: Boston. p. 1-39.
- 19- Kalaiselvam, S. and R. Parameshwaran, Chapter 1 - Energy and Energy Management, in Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability, S.K. Parameshwaran, Editor. 2014, Academic Press: Boston. p. 1-19.
- 20- Deng J., Wang RZ., Han GY., "A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems", Progress in Energy and Combustion Science , 2011, 37, pp 172-203.
- 21- Chicco G, Mancarella P, "Trigeneration primary energy saving evaluation for energy planning and policy development", Energy Policy, 2007, 35, pp 6132-44.
- ۲۲- محمود چهارطاقی، ۲۰۱۴، "بررسی عملکرد سیستم های تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش (CCHP)، با محرک اولیه پیل سوختی"، سومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی.
- 23- Dincer, I. and C. Zamfirescu, Chapter 2 - Energy, Environment, and Sustainable Development, in Advanced Power Generation Systems, I.D. Zamfirescu, Editor. 2014, Elsevier: Boston. p. 55-93.
- 24- Wu DW., Wang RZ., "Combined cooling, heating and power: A review", Progress in Energy and Combustion Science , 2006, 32, pp 459-495.
- 25- COGEN Europe (The European Association for the Promotion of Cogeneration, [www.cogen.org](http://www.cogen.org)). The European educational tool on cogeneration, 2nd ed. December 2001.
- 26- The National Renewable Energy Laboratory (NREL), The Department of Energy (DOE), Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) and the Gas Research Institute (GRI). Gas-fired distributed energy resource technology characterizations. October 2003.

- 27- Basso, T.S. and DeBlasio, R., IEEE1547 series of standards: interconnection issues. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013 VOL 19,5.
- 28- Hardy, J.D, Cooling, Heating, and power for Buiding Instructional Module, Mississippi State University, 2013.
- ۲۹- دکتر علی بخش کسائیان، دکتر رضا علائی، ۱۳۹۴، "سامانه های تولید همزمان توان و حرارت (CHP) برای مصارف ساختمانی"، یاوریان
- 30- Winterbone, D.E. and A. Turan, Chapter 17 - Gas Turbines, in Advanced Thermodynamics for Engineers (Second Edition), D.E.W. Turan, Editor. 2015, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 381-422.
- 31- S, Li, J.Y, Wu," Theoretical research of a silica gel–water adsorption chiller in a micro combined cooling, heating and power (CCHP) system" Applied Energy 86(2009) 958-967.
- 32- Saliya Jayasekara, Saman K. Halgamuge," A combined effect absorption chiller for enhanced performance of combined cooling heating and power systems" Applied Energy 127 (2014) 239-248.
- 33- Marcos, J.D., M. Izquierdo, and E. Palacios, New method for COP optimization in water- and aircooled single and double effect LiBr–water absorption machines. International Journal of Refrigeration, 2011. 34(6): p. 1348-1359.
- 34- Kong XQ, Wang RZ, Huang XH., "Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine", Energy Conversion and Management, 2004,45, pp 1433-42.
- 35- Breeze, P., Chapter 5 - Piston Engine–Based Power Plants, in Power Generation Technologies (Second Edition), P. Breeze, Editor. 2014, Newnes: Boston. p. 93-110.

- 36- Ulloa, C., et al., Feasibility of using a Stirling engine-based micro-CHP to provide heat and electricity to a recreational sailing boat in different European ports. *Applied Thermal Engineering*, 2013. 59(1): p. 414-424.
- 37- Heejin Cho, Amanda D. Smith , Pedro Mago, " Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization" *Applied Energy* 136(2014) 168-185.
- 38- Popli, S., P. Rodgers, and V. Eveloy, Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry. *Applied Thermal Engineering*, 2013. 50(1): p. 918-931.
- 39- U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership (2008), "CHP Project development Handbook"
- 40- . F. Ascione, et al., "Combined cooling, heating and power for small urban districts: An Italian case-study," *Applied Thermal Engineering* (2013), [www.dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.058](http://www.dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.058)
- 41- Tehrani, S.S.M., et al., Development of a CHP/DH system for the new town of Parand: An opportunity to mitigate global warming in Middle East. *Applied Thermal Engineering*, 2013. 59(1): p. 298-308.
- 42- Xu, X.X., et al., " Energy and exergy analyses of a modified combined cooling, heating, and power system using supercritical CO 2". *Energy*, 2015. 86: p. 414-422.
- 43- Xi Chen, Guangcai Gong, Zhongmin Wan, Liang Luo, Junhua Wan," Performance analysis of 5 kW PEMFC-based residential micro-CCHP with absorption chiller" *HYDROGEN ENERGY* 40(2015) 10647-10657.
- 44- Dinesh A. Mirchandania, Albert L. Lederer," The impact of core and infrastructure business activities on information systems planning and effectiveness" *Information Management* 34 (2014) 622-633.
- 45- Mokhatab, S., W.A. Poe, and J.Y. Mak, Chapter 1 - Natural Gas Fundamentals, in *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing* (Third Edition), S.M.A.P.Y. Mak, Editor. 2015, Gulf Professional Publishing: Boston. p. 1-36.

۴۶- وحید یغمائی، ۱۳۹۳، "طراحی و ساخت چیلر جذبی لیتیوم بروماید با تغذیه آب گرم (یک تن تبرید)"، نخستین همایش بین المللی چیلر و برج خنک کن ایران.

47- Zhe Tian, Jide Niu, Yakai Lu, Shunming He, Xue Tian," The improvement of a simulation model for a distributed CCHP system and its influence on optimal operation cost and strategy"Applied Energy 165(2016) 430-444.

## Abstract:

All developed countries are considering energy optimization as the most significant and efficient resolution of reducing energy consumption and environmental pollutants. Since world energy consumption increase there is much demand for trustworthy energy and electricity generator systems. Those concerned countries are making lots of attempts to optimize their energy consumption management itself as an energy source. Combined cool, heat and power (CCHP) technology is one of these attempts which could generate electricity or mechanical power so that their additional heat could be considerably recycled to be used as coolness and heating. The most significant advantage of CCHP can be its wastage reduction in distribution web. Moreover there are some other advantages such as energy consumption, total efficiency boost and pollutant reduction. These systems normally consist of heat recovery set, initial stimulus, heat exchanger, absorption chillers and monitoring equipment.

This search is going to make an endeavor to investigate cogeneration system by gas micro turbine, heat exchanger and absorption chiller in Mahban Darou Co. In order to achieve more adequate analysis result, the research took advantage of Termoflex Module of Termoflo Software to model the system. Having an eye on a normal building thermal and electrical load, then it reviews different thermal and electrical scenarios to achieve the optimal balance. Since the end was having a great improvement in Mahban Darou Co. energy generator, the research took previous studies into consideration in order to do the best in modeling its CCHP unit.

**Key words:** *Optimization, Cogeneration system, CCHP, Heat exchangers, Absorption chiller*





Energy Institute Of Higher Education

Faculty Of Engineering

Department Of Energy System Engineering – Energy Technology

Theisis For

Degree Of Master Of Scince(M.Sc)

Title:

# Optimaition CCHP with used Microturbine, Heat exchanger and absorbtion Chiller in Mahban Darou Company

Supervisor:

Dr. Mojtaba Mirzaee

Advisor:

Dr. Reza Alayi

By:

Mahnaz Rajabi

winter/1395

