بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک

مدلسازی سیکل توربین گاز همراه با خنک کاری هوای ورودی به روش ذخیره‌سازی سرمایش

ابراهیم خلیلی اردلی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

استاد راهنما: **دکتر سید مصطفی حسینعلی پور**
استاد مشاور: **دکتر رضا تقوی**

اسفندماه ۱۳۸۵

چکیده

از جمله عوامل مؤثر در میزان توان خروجی توربین گاز، دمای محیط است. زیرا افزایش دمای محیط باعث کاهش چگالی هوا و در نتیجه کاهش دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور می‌شود. از طرفی توان تولیدی رابطه مستقیم با دبی جرمی داشته، بنابراین با کاهش دبی جرمی ورودی، توان تولیدی هم کاهش می‌یابد. بنابراین اگر بتوان هوای ورودی به توربین گاز را به طریقی خنک کاری نمود، می‌توان مسأله کاهش توان را برطرف نمود. در این پروژه ابتدا انواع روشهای خنک-کاری هوای ورودی به توربین گازی بیان شده و قابلیت و جایگاه استفاده هر یک تشریح گردیده است. از آنجا که هدف اصلی در این پروژه بررسی سیستم خنک‌کاری هوای ورودی به کمک ذخیره‌سازی سرمایش است، این روش بیشتر و کاملتر توضیح و سپس مدلسازی گشته است. همچنین اجزاء مختلف توربین گاز هم مدلسازی شده و در نهایت با کوپل نمودن آنها مدلسازی سیکل توربین گاز با خنک‌کاری هوای ورودی به کمک ذخیره‌سازی سرمایش بدست آمده است.

نتیجه این مدل برای یک نوع توربین خاص (توربین‌های گاز واقع در ایستگاه تقویت فشار گاز نیزار قم) بررسی گشته و اثر خنک‌کاری هوای ورودی بر روی پارامترهای مختلف سیکل مشاهده شده است. از آنجا که سیستم‌های ذخیره‌سازی سرمایش شامل ذخیره‌سازی آب سرد و یخ می‌باشند، این دو روش با هم بررسی شده و با ارزیابی فنی و اقتصادی، روش ذخیره‌سازی آب سرد به عنوان روش بهینه انتخاب شده است. به عنوان مطالعه موردی نتایج سیستم بهینه برای توربین گاز مورد نظر ارائه شده است.

تقدیم به مادر مهربانم

که با دستهای پر مهر خود درخت جوانیم را بارور نمود و امروز ثمره

تلاشهایم را به قلب مهربانش تقدیم می‌کنم.

تقدیر و تشکر

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم که از زحمات استاد بزرگوار جناب آقای دکتر سید مصطفی حسینعلی‌پور به جهت زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده‌شان در انجام این پروژه، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین از جناب آقای دکتر رضا تقوی که در طول انجام این پروژه با ما نهایت همفکری و همکاری را داشته‌اند، سپاسگذاری می‌نمایم.

در پایان به پاس همکاری‌های مدیریت محترم پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران (جناب آقای دکتر سعید پاک-سرشت و آقای مهندس حمید بنیاد) که اطلاعات ارزشمندی در رابطه با این پروژه در اختیار ما قرار دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول : مقدمه

۱-۱) اثرات دما بر عملکرد توربین گاز ۱

۱-۲) سرمایش هوای ورودی به توربین گاز ۵

فصل دوم : تکنولوژی‌های خنک کاری هوای ورودی به توربین‌گاز

۲-۱) مقدمه ۷

۲-۲) سیستم های خنک کننده تبخیری ۸

۲-۲-۱) سیستم ایرواشر ۹

۲-۲-۲) سیستم مدیا ۱۰

۲-۲-۳) سیستم خنک کاری تبخیری فاگ ۱۱

۲-۲-۴) کیفیت آب مصرفی ۱۳

۲-۳) سیستم خنک کننده برودتی ۱۴

۲-۴) سیستم ذخیره سازی سرما ۱۸

۲-۴-۱) انواع ذخیره سازی سرما ۲۰

۲-۴-۲) استراتژی های بهره برداری ۲۲

۲-۵) معیارهای انتخاب و مقایسه کلی روشهای خنک کاری هوای ورودی به توربین گازی ۲۶

فصل سوم: مروری بر کارهای انجام شده در زمینه افزایش قدرت خروجی توربین گاز از طریق ذخیره‌سازی سرمایش

۳-۱) افزایش ظرفیت توربین گاز 18 Mw با استفاده از ذخیره سازی سرما در مالزی ۲۹

۳-۲) افزایش ظرفیت توربین گاز مدل ABB1N11 با استفاده از ذخیره سازی سرما ۳۱

۳-۳) افزایش ظرفیت توربین گاز 36 Mw با استفاده از ذخیره‌سازی سرما در کالیفرنیا ۳۲

۳-۴)سیستمهای ذخیره‌سازی سرمایش هوای ورودی به توربین‌گازی در کارولینای شمالی ۳۳

۳-۵) خنک کاری هوای ورودی به توربین مدل Westinghouse 501 D4 در عربستان سعودی ۳۶

۳-۶) شرکت برق ایالت لینکولن انگلستان ۳۷

۳-۷) افزایش توان توربین های گازی 31Mw کالیفرنیا به کمک ذخیره سازی یخ ۳۸

۳-۸) خنک کاری هوای ورودی به توربین در نیروگاه کالپین به کمک ذخیره سازی سرما ۳۹

۳-۹) استفاده از ذخیره سازی سرما در نیروگاه ایسلند ۴۰

عنوان | صفحه

فصل چهارم: ذخیره سازی آب سرد و ذخیره سازی یخ

۴-۱) سیستم ذخیره سازی آب سرد (Chilled Water Storage) ۴۱
۴-۱-۱) شرح فرایند ۴۱
۴-۱-۱-۱)تشکیل لایه (Stratification) ۴۲
۴-۱-۱-۲) استفاده از چند تانک (Multiple Tank) ۴۴
۴-۱-۱-۳) استفاده از غشا یا دیافراگم (Memberance & Diaphragm) ۴۵
۴-۱-۱-۴) استفاده از مارپیچ و بافل (Labyrinth & Baffle) ۴۵
۴-۱-۲) سیستم های تبرید ۴۶
۴-۱-۳) تانکهای ذخیره ۴۶
۴-۱-۴) مشخصات شارژ و تخلیه ۴۸
۴-۲)ذخیره سازی یخ (Ice Harvesting Storage) ۴۸
۴-۲-۱) شرح فرایند ۴۸
۴-۲-۲) سیستم های تبرید ۵۰
۴-۲-۳) تانکهای ذخیره سازی یخ ۵۳
۴-۲-۴) هزینه های سرمایه گذاری اولیه ۵۴
۴-۲-۵)ذخیره سازی یخ روی لوله با ذوب خارجی (External Melt Ice - on - Coil Storage) ۵۴
۴-۲-۶) ذخیره سازی یخ روی لوله با ذوب داخلی ۵۷
۴-۲-۷) ذخیره سازی یخ کپسولی (Encapsulated Ice storage) ۵۸

فصل پنجم: آنالیز سیکل توربین‌گازی همراه با سیستم خنک‌کن هوای ورودی به روش ذخیره‌سازی سرمایش

۵-۱) مقدمه ۶۰
۵-۲) فرایند خنک کاری ورودی به کمپرسور توربین گاز ۶۱
۵-۳ روشهای محاسبه بار سرمایش ۶۴
۵-۴) فرایند تراکم هوای مرطوب در کمپرسور ۶۸
۵-۵) تحلیل محفظه احتراق ۶۹
۵-۶) تحلیل توربین ۷۳
۵-۷ ذخیره سازی آب سرد Chilled Water Storage ۷۵
۵-۸ ذخیره سازی یخ Ice Harvesting ۷۷
۵-۹) طراحی مبدل حرارتی جدید ۸۰

عنوان | صفحه

۵-۱۰) الگوریتم مربوط به مدلسازی سیستم ذخیره سازی سرمایش..... ۸۴
۵-۱۱) راندمان سیکل توربین گاز..... ۸۸
۵-۱۱-۱) سیکل ساده توربین گازی..... ۸۸
۵-۱۱-۲) سیکل توربین گاز همراه با مبدل حرارتی..... ۸۹
۵-۱۱-۳) سیکل توربین گاز همراه با گرمایش مجدد..... ۹۲
۵-۱۱-۴) سیکل توربین گازی همراه با مبدل حرارتی و گرمایش مجدد..... ۹۳

فصل ششم : امکان سنجی و نتایج مدل ذخیره‌سازی سرمایش هوای ورودی به توربین گاز

۶-۱) مقدمه ۹۸
۶-۲) شرایط آب و هوایی محیط (Site Condition)..... ۹۹
۶-۳) مشخصات فنی توربین های گازی ایستگاه تقویت فشار نیزار قم و عملکرد آن..... ۱۰۱
۶-۴) خروجی‌های برنامه..... ۱۰۵
۶-۴-۱) تغییرات پارامترهای مربوط به بار سرمایش..... ۱۰۵
۶-۴-۲) تأثیر دمای ورودی بر عملکرد توربین گاز..... ۱۰۸
۶-۴-۳) خروجی‌های برنامه مربوط به سیستم استفاده از بار سرمایش ۱۱۴
۶-۵) ارزیابی اقتصادی..... ۱۲۰
۶-۵-۱) مقایسه اقتصادی سیستم‌های ذخیره‌سازی آب سرد و یخ و انتخاب حالت بهینه..... ۱۲۲
۶-۶) نتیجه گیری..... ۱۲۷
۶-۷) پشنهادات..... ۱۲۹

منابع و مراجع ۱۳۰

پیوست‌ها

پیوست۱ ..... ۱۳۳
پیوست۲..... ۱۳۴
پیوست۳..... ۱۳۵

فهرست شکل‌ها و نمودارها

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه

شکل(۱-۱): منحنی عملکرد یک نوع متداول توربین گاز صنعتی..... ۳
شکل(۱-۲): خنک کاری جریان هوای گرم محیط با عبور از کویلهای سرمایش ۳
شکل(۱-۳): توان خروجی توربین گاز در حالت بدون خنک‌کاری و با سرمایش هوای ورودی..... ۴
شکل(۱-۴): شماتیک سیستم سرمایش هوای ورودی به توربین گاز..... ۵

فصل دوم : تکنولوژی‌های خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز

شکل(۲-۱): شماتیک ساده ایرواشر خنک کننده هوای ورودی به توربین گازی..... ۹
شکل(۲-۲) سیستم سرمایش مدیا ۱۰
شکل(۲-۳): یک نوع سیستم خنک کاری به روش فاگ..... ۱۲
شکل(۲-۴): چیدمان یکنواخت نازلهای فاگ درون اتاق فیلتر توربین..... ۱۲
شکل(۲-۵): دیاگرام خنک کاری هوای ورودی به توربین گاز با استفاده از چیلر جذبی..... ۱۵
شکل(۲-۶): شماتیک خنک کن هوای ورودی به کمک چیلر تراکمی..... ۱۶
شکل(۲-۷): مقایسه روند خنک کاری تبخیری و خنک کاری تبریدی..... ۱۷
شکل(۲-۸): شماتیک سیستم سرمایش هوای ورودی به توربین گاز به کمک ذخیره سازی سرما..... ۱۸
شکل(۲-۹): قابلیت ذخیره‌سازی سرما برای هر یک از واسطه‌های ذخیره‌سازی..... ۲۰
شکل(۲-۱۰): استراتژی‌های بهره برداری ذخیره‌سازی سرما..... ۲۴
شکل(۲-۱۱): شماتیک سیکل شارژ در ذخیره‌سازی سرما..... ۲۵
شکل(۲-۱۲): شماتیک سیکل تخلیه در ذخیره‌سازی سرما..... ۲۵

فصل سوم: مروری بر کارهای انجام شده در زمینه افزایش قدرت خروجی توربین گاز از طریق سرمایش هوای ورودی

شکل(۳-۱): شماتیک سیستم ذخیره سازی یخ و خنک کن هوای ورودی به توربین گاز..... ۳۰
شکل(۳-۲): نمونه تبخیر کننده نصب شده بروی یکی از تانکهای ذخیره‌سازی یخ..... ۳۲
شکل(۳-۳): طرح سرمایش هوای ورودی به توربین گاز واحد تولید همزمان برق و بخار کالیفرنیا..... ۳۳
شکل(۳-۴): پمپ های آب سرد پروژه توربین گازی 25 Mw کارولینای شمالی..... ۳۵
شکل(۳-۵): نمایی از توربین های گاز به ظرفیت اسمی 70Mw در عربستان..... ۳۶
شکل(۳-۶): نمایی از تانکهای ذخیره‌سازی سرمایش در ایالت لینکولن انگلستان..... ۳۷
شکل(۳-۷):سرمایش هوای ورودی به توربین گاز به کمک ذخیره سازی سرما در کالیفرنیا..... ۳۸

عنوان | صفحه

شکل(۳-۸):تانک ذخیره‌سازی سرما و سیستم خنک‌کن ورودی به توربین‌های گاز نیروگاه کالپین..... ۳۹
شکل(۳-۹): نمایی از ساخت تانکهای بتنی ذخیره سازی یخ در نیروگاه ایسلند..... ۴۰

فصل چهارم: ذخیره‌سازی آب سرد و ذخیره سازی یخ

شکل(۴-۱): نمایی از Thermocline تشکیل شده در تانک ذخیره آب سرد..... ۴۳
شکل(۴-۲): دیاگرام شماتیک ذخیره‌سازی آب سرد با تشکیل لایه..... ۴۴
شکل(۴-۳): شمای کلی از سیستم ذخیره سازی یخ Ice Harvesting..... ۴۹
شکل(۴-۴): دیاگرام شماتیک ذخیره سازی یخ Ice Harvesting..... ۴۹
شکل(۴-۵): یک واحد تبخیر کننده Ice Harvester..... ۵۰
شکل(۴-۶) چندین واحد تبخیر کننده با یک واحد تبرید مرکزی..... ۵۱
شکل(۴-۷): شماتیک سیکل تشکیل یخ..... ۵۲
شکل(۴-۸): شماتیک سیکل جدا شدن یخ از صفحات تبخیر کننده..... ۵۲
شکل(۴-۹): فرایند شارژ و تخلیه ذخیره سازی یخ با ذوب خارجی..... ۵۴
شکل(۴-۱۰): شماتیک سیستم ذخیره سازی یخ با ذوب خارجی با استفاده از مبرد مستقیم..... ۵۶
شکل(۴-۱۱): ذخیره سازی یخ با ذوب خارجی با استفاده از مبرد ثانویه..... ۵۶
شکل(۴-۱۲): فرایند شارژ و تخلیه در سیستم ذخیره سازی یخ روی لوله با ذوب داخلی..... ۵۷
شکل(۴-۱۳): دیاگرام شماتیک ترتیب قرار گرفتن چیلر قبل و بعد از بار سرمایش..... ۵۸
شکل(۴-۱۴):تشکیل و ذوب شدن یخ در طی سیکل شارژ و تخلیه در ظرف کروی... ۵۹

فصل پنجم: آنالیز سیکل توربین‌گازی همراه با سیستم خنک‌کن هوای ورودی به روش ذخیره‌سازی سرمایش

شکل(۵-۱)شماتیک اجزای سیکل توربین گاز و نقاط پنج گانه ای که در مدلسازی تحلیل می‌شوند ۶۰
شکل(۵-۲):حجم کنترل فرایند کویل سرمایش ۶۳
شکل(۵-۳): دیاگرام سایکرومتریک و نمایش تحولات سرمایش در حالت کلی..... ۶۵
شکل(۵-۴): الگوریتم برنامه در مرحله رطوبت سنجی..... ۶۷
شکل(۵-۵):الگوریتم برنامه در مرحله کمپرسور..... ۶۹
شکل(۵-۶): الگوریتم برنامه در محفظه احتراق..... ۷۲
شکل(۵-۷): الگوریتم برنامه در مرحله توربین..... ۷۴
شکل(۵-۸): شماتیک سیستم ذخیره سازی آب سرد جهت خنک کاری هوای ورودی ... ۷۵
شکل(۵-۹): شماتیک سیستم ذخیره سازی یخ جهت خنک کاری هوای ورودی به توربین گاز... ۷۸
شکل(۵-۱۰): الگوریتم کلی برنامه شبیه سازی سیستم ذخیره‌سازی سرمایش..... ۸۶

عنوان | صفحه

شکل(۵-۱۱): الگوریتم مربوط به کوپل مدلسازی سیکل توربین‌گاز و سیستم ذخیره‌سازی سرمایش ۸۷
شکل(۵-۱۲): شماتیک سیکل استاندارد هوایی برایتون.....۸۸
شکل(۵-۱۳): طرحواره سیکل ساده توربین گاز همراه با مبدل حرارتی.....۹۰
شکل(۵-۱۴): راندمان سیکل توربین گازی با مبدل حرارتی ۹۲
شکل(۵-۱۵): توربین مجهز به سیستم گرمایش مجدد ۹۳
شکل(۵-۱۶): راندمان سیکل توربین گازی با گرمایش مجدد.....۹۴
شکل(۵-۱۷): طرحواره سیکل بازیافت همراه مبدل حرارتی ۹۵
شکل(۵-۱۸): نمودار راندمان سیکل گرمایش مجدد و بازیافت با مبدل حرارتی ۹۷

فصل ششم: امکان سنجی و نتایج مدل ذخیره‌سازی سرمایش هوای ورودی به توربین گاز

شکل(۶-۱) : شمای کلی از مانیتورینگ اطلاعات سیکل توربین گاز به کمک سیستمPLC.....۹۹
شکل(۶-۲): نمودار تغییرات متوسط دمای ماهیانه هر ساعت از روز..... .....۱۰۰
شکل (۶-۳): منحنی عملکرد توربین گاز MS5002C در منطقه عملیاتی نیزار..... .....۱۰۳
شکل (۶-۴): منحنی عملکرد واقعی توربین گاز MS5002C منطقه نیزار..... .....۱۰۴
شکل(۶-۵): تغییرات بار سرمایش بر حسب دمای مطلوب ورودی به کمپرسور..... .....۱۰۶
شکل(۶-۶): دبی آب تقطیر شده بر حسب دماهای ورودی به کمپرسور..... .....۱۰۷
شکل(۶-۷): تغییرات نسبت رطوبت در ورودی کمپرسور بر حسب دمای خنک کاری..... .....۱۰۷
شکل(۶-۸): تغییرات رطوبت نسبی در ورودی کمپرسور برحسب دمای خنک کاری..... .....۱۰۸
شکل(۶-۹): نمودار کار مصرفی کمپرسور برحسب دمای هوای ورودی..... .....۱۰۸
شکل(۶-۱۰): نمودار کار مصرفی کمپرسور بر واحد جرم برحسب دمای هوای ورودی..... .....۱۰۹
شکل(۶-۱۱): تغییرات دمای خروجی از کمپرسور برحسب دمای هوای ورودی به آن..... .....۱۰۹
شکل(۶-۱۲): تغییرات توان ناخالص خروجی از توربین حسب دمای هوای ورودی..... .....۱۱۰
شکل(۶-۱۳): تغییرات توان خالص خروجی از توربین گاز حسب دمای هوای ورودی..... .....۱۱۰
شکل (۶-۱۴): توان خروجی و دبی ورودی توربین گاز بر حسب دمای هوای ورودی به کمپرسور ۱۱۱
شکل(۶-۱۵): توان خروجی توربین گاز در ماه‌های گرم سال ۱۱۳
شکل(۶-۱۶): سیستم گردش آب سرد ذخیره شده در مبدل حرارتی در ساعات پیک گرما... .....۱۱۴
شکل(۶-۱۷): دبی آب سرد خروجی از تانک ذخیره برحسب دمای ورودی به کمپرسور..... .....۱۱۵
شکل(۶-۱۸): حجم مبدل حرارتی برحسب دمای ورودی به کمپرسور..... .....۱۱۶
شکل(۶-۱۹): حجم تانک ذخیره آب سرد برحسب دمای هوای ورودی به کمپرسور..... .....۱۱۷
شکل(۶-۲۰): شماتیک سیکل تولید آب سرد..... .....۱۱۷
شکل(۶-۲۱): تناژ چیلر برحسب دمای خنک کاری مطلوب برای هر دوحالت ذخیره‌سازی... .....۱۱۸

عنوان صفحه

شکل(۶-۲۲): سیکل ترمودینامیکی و نمودار دما-آنتروپی برای سیکل چیلر تراکمی.....۱۱۹
شکل(۶-۲۳): نمودار دوره بازگشت سرمایه برحسب دمای مطلوب ورودی به کمپرسور.....۱۲۲
شکل(۶-۲۴): بازگشت سرمایه با نرخ بهره ۸٪ برحسب دمای مطلوب ورودی به کمپرسور.....۱۲۲
شکل(۶-۲۵): بازگشت سرمایه ازای دماهای مختلف خروجی از مبدل حرارتی.....۱۲۴
شکل(۶-۲۶): ابعاد و حجم مبدل حرارتی بر حسب دمای آب گرم خروجی از آن.....۱۲۵
شکل(۶-۲۷): افت فشار ایجاد شده در سمت آبی و سمت هوایی مبدل حرارتی ۱۲۶

فهرست جداول

عنوان صفحه

فصل دوم: تکنولوژی‌های خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز

جدول(۲-۱) مقایسه تکنولوژی‌های خنک کاری هوای ورودی ۲۷
جدول(۲-۲) مزایای تکنولوژی‌های خنک کاری هوای ورودی..... ۲۷
جدول(۲-۳) معایب تکنولوژی‌های خنک کاری هوای ورودی..... ۲۸

فصل پنجم: آنالیز سیکل توربین‌گازی همراه با سیستم خنک‌کن هوای ورودی به روش ذخیره‌سازی سرمایش

جدول(۵-۱): ضرایب ثابت در معادلات رطوبت سنجی..... ۶۲

فصل ششم: امکان سنجی و نتایج مدل ذخیره‌سازی سرمایش هوای ورودی به توربین گاز

جدول(۶-۱): مشخصات فنی توربین های MS5002C در شرایطISO..... ۱۰۲
جدول(۶-۲): سیستم نهایی انتخابی به منظور سرمایش هوای ورودی به کمپرسور..... ۱۲۸

واژه نامه

الف	
آدیاباتیک	adiabatic
آلودگی حرارتی	thermal pollution
آنتالپی	entalpy
آنتروپی	entropy
آیرودینامیک	aerodynamic
احتراق	combustion
ارتعاش	vibration
افت فشار	pressure loss
انبساط	expantion
انرژی جنبشی	kinetic energy
انرژی داخلی	internal energy
ایمنی	safety
ب	
باززایی	regeneration
بازیافت حرارتی	reheat
بخار	steam
بهره برداری	operation
پ	
پمپ	pump
ت	
تراکم	compression
ترمودینامیک	thermodynamics
تک اتمی	monoatomic
توان	power
توربوژنراتور	turbogenerator
توربین گازی	gas turbine
توربین گازی تک محوری	single shaft gas turbine
توربین گازی دو محوری	double shaft gas turbine
تولید	production

ج

جرم	mass
جو	atmosphere

خ

خروجی توربین	exhaust turbine
خودکار	automatic

د

دواتمی	diatomic
دیگ بخار	boiler
دما	temperature

س

سرعت	velocity
سیکل	cycle
سیکل باز	open cycle
سیکل مستقیم	direct cycle
سیکل غیر مستقیم	indirect cycle
سیکل برایتون	brayton cycle

ع

عایق کاری	insulator
عدد ماخ	mach number
عملکرد	performance

ف

فشار ثابت	constant pressure
فناوری	technology

ک

کارایی	efficiency
کار محوری	shaft work
کار ویژه	work specific
کمپرسور	compressor

گ

گاز طبیعی	natural gas
گاز کامل	perfect gas

گرمای ویژه	specific heat

م

مبدل حرارتی	heat exchanger
محفظه	combustion
محور	shaft
معادله اندازه حرکت	momentum equation
معادله انرژی	energy equation
معادله پیوستگی	continuity equation
موتور جت	jet engine

ن

نسبت تراکم	compression ratio
نسبت فشار	pressure ratio
نصب	installation

و

واحد گازی	gas plant
واکنش بازگشت پذیر	reversible process
واکنش دما ثابت	isotermal process
واکنش فشار ثابت	iso bar
وزن مخصوص	density

ه

هوای اضافی	excess air
هیدروالکتریک	hydroelectric

فصل اول

مقدمه

۱-۱) اثرات دما بر عملکرد توربین گاز

توربین‌های گاز در سالهای اخیر کاربردهای گسترده‌ای در بخش تولید انرژی الکتریکی، افزایش فشار خط در ایستگاه‌های انتقال گاز و تولید قدرت لازم در کمپرسورهای افزاینده فشار خط، استفاده در نیروگاههای سیکل ترکیبی و ... دارند. از مزیتهای اساسی این توربین ها میتوان حجم کم، قدرت بالای تولیدی به نسبت حجم، سهولت جابجایی و نیز راندمان حرارتی بالای توربین و قابلیت استفاده از گازهای داغ خروجی برای راه اندازی یک سیکل توربین بخار (سیکل ترکیبی) را عنوان کرد. از معایب این توربین ها تحت تأثیر قرار گرفتن راندمان و توان خروجی توسط شرایط جوی و محیطی می‌باشد. به طوری که با افزایش دما و در نتیجه کاهش چگالی هوای ورودی، توان خروجی توربین به میزان قابل توجهی افت می‌کند که این عامل در مسیر خطوط انتقال گاز با کاهش فشار خط، در نیروگاه های برق با کاهش توان تولیدی و در مجتمعهای پتروشیمی با کاهش تولیدات خروجی همراه است. برای شرایط جوی یک شرایط مرجع موسوم به شرایط ایزو تعریف می‌شود که دما $15°C$ و رطوبت نسبی 60% و فشار یک اتمسفر می‌باشد و ظرفیت توربین ها در این شرایط کارکرد ارائه می‌شود. مسلماً با تغییر شرایط محیط ظرفیت توربین‌ها (اعم از توان تولیدی، راندمان و نرخ گرمایی) متفاوت از مقدار ارائه شده برای حالت ایزو است. به ازای افزایش هر $1°C$ در دمای ورودی، کاهش برابر 0.7% در توان خروجی توربین و به ازای افت فشار یک کیلو پاسکال در فشار ورودی کاهش یک درصدی در توان خروجی توربین گاز به وجود می‌آید[۳۳]. عملکرد توربین گاز (شامل قدرت خروجی، نرخ حرارتی و راندمان) تحت تأثیرعوامل مختلفی می‌باشد. از جمله این عوامل فشار هوای محیط، تغییرات فشار جو در اثر آب و هوا، افت فشار ناشی از عبور هوا از فیلترها و مجاری ورودی جریان هوا به کمپرسور می‌باشد. فشار هوای ورودی بالاتر تا اندازه‌ای موجب بالا رفتن قدرت خروجی و اندکی هم باعث بهبود راندمان می‌شود. اگرچه مهمترین عاملی که بر روی عملکرد توربین گاز تأثیر می‌گذارد دمای هوای ورودی

می‌باشد. توربینهای گاز ماشینهای حجم ثابت هستند، بنابراین در یک دور ثابت، هوای ورودی بدون توجه به شرایط هوای محیط به یک حجم ثابت محدود می‌شود. با افزایش دمای هوا طبق رابطه گاز کامل، دانسیته آن کم می‌شود:

$$P = \rho RT \rightarrow \rho = \frac{P}{RT} \qquad (۱-۱)$$

بنابراین درحالی که دبی حجمی ثابت است، دبی جرمی کاهش می‌یابد.

$$\dot{V} = \text{const.} \qquad (۲-۱)$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \Rightarrow \downarrow \rho \propto \downarrow \dot{m} \qquad (۳-۱)$$

توان خروجی توربین گاز نیز که متناسب با دبی جرمی هوای ورودی است با افزایش دمای هوای ورودی کاهش می‌یابد. از آنجا که توان بیشتری برای متراکم نمودن هوای گرم لازم است، راندمان توربین گاز نیز کاهش می‌یابد. کار کمپرسور بر واحد جرم هوا نیز برابر است با:

$$w_{comp.} = \frac{h_2 - h_1}{\eta_c} = \frac{c_P(T_2 - T_1)}{\eta_c} = \frac{c_P T_1(\frac{T_2}{T_1} - 1)}{\eta_c} = \frac{c_P T_1(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1)}{\eta_c} \qquad (۴-۱)$$

نقاط ۱و۲ ورودی و خروجی کمپرسور هستند. رابطه واقعی بین دمای هوای ورودی و عملکرد توربین گاز وابسته به نوع و مدل خاص توربین گاز متغیر است. تأثیر دمای هوای ورودی بر دبی جرمی، توان خروجی و نرخ حرارتی برای یک نوع متداول توربین گاز صنعتی در شکل (۱-۱) آمده است. راندمان تبدیل توربین گاز معمولاً بصورت نرخ حرارتی گزارش می‌شود که عبارت است از میزان انرژی سوخت مصرف شده به ازای یک کیلووات توان تولیدی. بنابراین افزایش نرخ حرارتی معادل کاهش راندمان می‌باشد. مطابق شکل (۱-۱) عملکرد توربین گاز بطور عمومی در شرایط ایزو 59°F برابر 100% ارزیابی می‌شود. در دماهای هوای ورودی بین 90°F - 100°F، قدرت خروجی توربین گاز تقریباً بین 80% تا 85% نسبت به شرایط ایزو کاهش می‌یابد. افزایش بیشتر دمای هوای ورودی باعث کاهش بیشتر قدرت خروجی توربین گاز می‌شود. در دمای هوای ورودی بین 20°F - 50°F، قدرت خروجی توربین گاز تقریباً تا 105% نسبت به شرایط ایزو افزایش می‌یابد. کاهش بیشتر دمای هوای ورودی باعث افزایش بیشتر قدرت خروجی توربین می‌شود[۱۰].

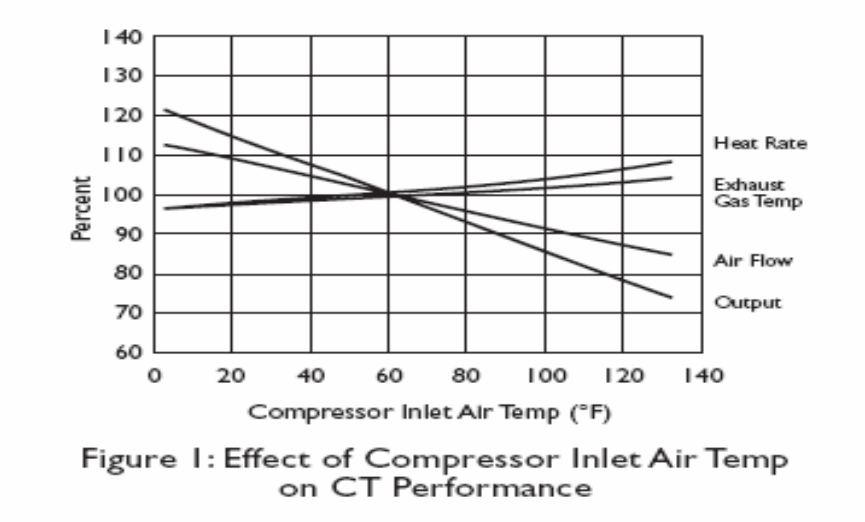
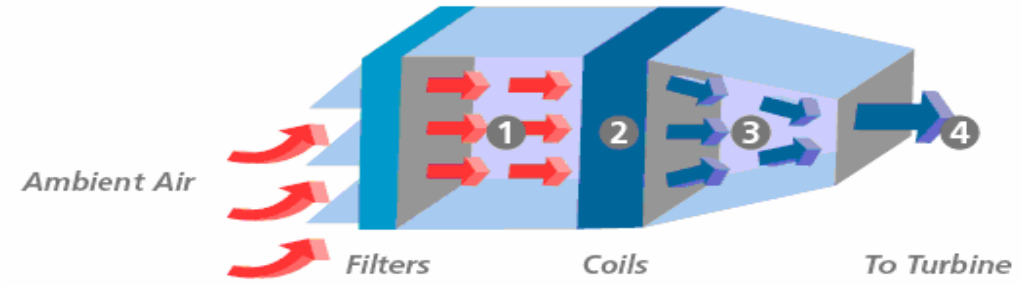


Figure 1: Effect of Compressor Inlet Air Temp on CT Performance

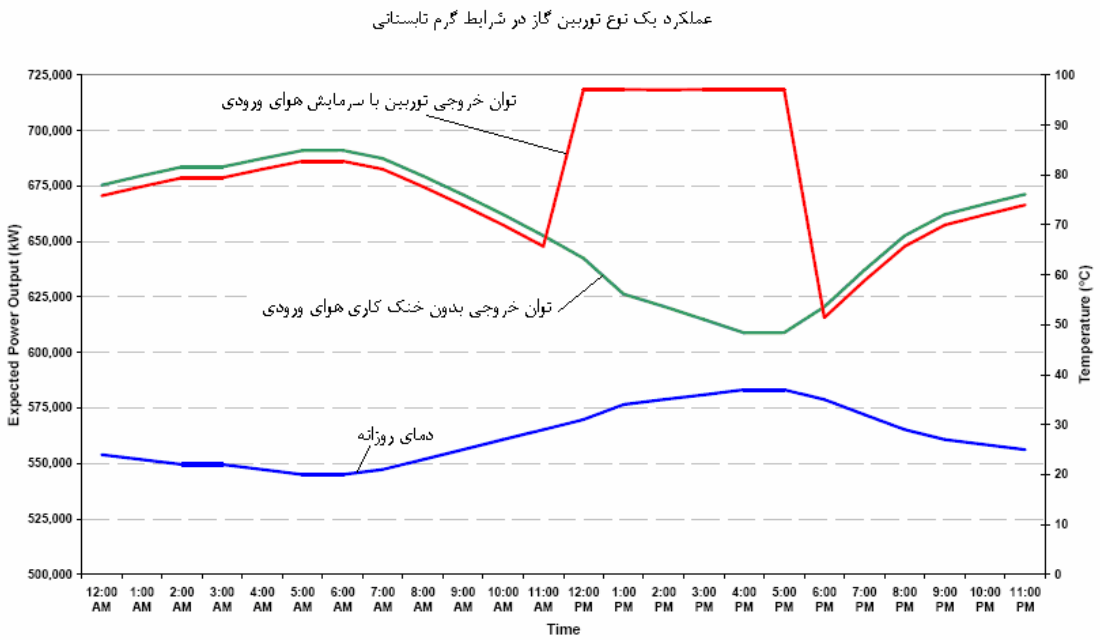
شکل(۱-۱): منحنی عملکرد یک نوع متداول توربین گاز صنعتی[۳]

اگرچه امکان سرمایش هوای ورودی تا دمای زیر 40°F وجود دارد و این کاهش باعث افزایش بیشتر قدرت خروجی توربین گاز می‌شود، اما سازندگان توربین گاز آن را توصیه نمی‌کنند زیرا اگر دمای هوای ورودی نزدیک به دمای یخ زدن باشد باعث یخ زدگی در قسمت ورودی کمپرسور می‌گردد. بطور خلاصه در زمانهایی که دمای هوای ورودی بالا است، اگر دمای هوا از 90°F-100°F به 40°F-50°F کاهش یابد، باعث افزایش 20%-30% قدرت خروجی توربین گاز می‌گردد. علاوه بر آن باعث بهبود نرخ حرارتی و راندمان سوخت به میزان 5% می‌شود[۱۰].



شکل(۱-۲): خنک کاری جریان هوای گرم محیط با عبور از کویلهای سرمایش

سرمایش هوای ورودی، توان خروجی و نرخ حرارتی را بهبود می‌بخشد ولی تأثیر آن بر توان خروجی بیشتر است. در ماههای گرم سال که دمای هوای محیط بالا است، تقاضا برای تولید الکتریسیته (وقیمت الکتریسیته) افزایش می‌یابد. حال آنکه با افزایش دمای هوا قدرت خروجی توربین کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر همزمان با نیاز شبکه به ظرفیت تولید الکتریسیته بیشتر، قدرت خروجی کمتر می‌شود. یکی از روشهای افزایش قدرت خروجی در ماههای گرم سرمایش هوای ورودی است. معمولاً هدف اصلی سرمایش هوای ورودی به توربین گاز، افزایش قدرت خروجی می‌باشد. بهبود نرخ حرارتی نیز در مقام دوم اهمیت دارد. شکل (۱-۳) توان خروجی یک نوع توربین گاز را در شرایط گرم تابستانی نشان می‌دهد. مطابق این شکل سرمایش هوای ورودی در ساعات پیک گرما باعث افزایش توان خروجی به میزان قابل توجهی می‌شود.



شکل(۱-۳): توان خروجی توربین گاز در حالت بدون خنک کاری و با سرمایش هوای ورودی به توربین گاز[۲۹]