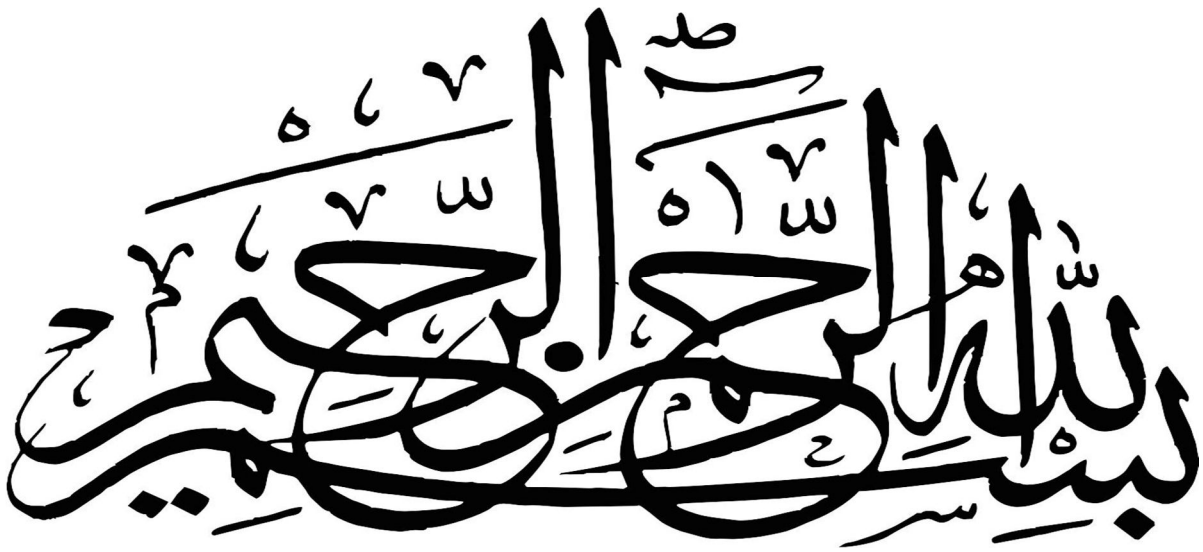

بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب **امیر حسین عتیق** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و درفهرست منابع و مأخذ ذکرگردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف(در هر زمان) مدرک تحصیلی صادرشده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی اثر متعلق به دانشگاه شهید رجایی می‌باشد.

امیرحسین عتیق

امضاء

دانشکده مکانیک

شبیه سازی و تحلیل ترمودینامیکی اثر سرمایش هوای ورودی بر افزایش راندمان یک سیکل توربین گازی در شرایط اقلیمی خوزستان

نگارش :

امیرحسین عتیق

استاد راهنما : دکترکریم مقصودی مهربان

استاد مشاور: دکتر کامران مبینی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مکانیک (تبدیل انرژی)

شهریورماه ۱۳۹۰

ShahidRajaee Teacher Training University

Faculty of Mechanics

Simulation and Thermodynamic Analysis of the effect of cooling Inlet air on a Gas Turbine performance working in Khoozestan

By: Amir Hossein Atigh

Under Supervision of Dr.Karim Maghsoudi

Co-Supervision of Dr.Kamran Mobini

A thesis submitted to the Graduate Studies Office in partial fulfillment of
The requirements for the degree of MA in

Mechanics

September 2011

Abstract

Efficiency and output power of gas turbine decrease while temperature and humidity increase, the maximum loss is inn summer and result in a lot of problems. To compensate this loss, cooling of compressor inlet air is used. Depend on place and condition of site, different method are used to achieve this target that briefly consist of vaporizing method, chilling method and storage method. Simulation of gas turbine items is necessary to predict the operation of gas turbine off-design. In this research paper, a single axle gas turbine in condition of off-design is used and effect of different method of cooling are considered. Result simulation of Solar Centaur T٤٥٠٠ in Ahwaz (the average of maximum temperature ٤٨.٢ C and relative humidity ١٣٪) exhibits decreasing ٢٨٪ of output power. According to the results while relative humidity increases, performance of vaporizing method decreases, then in warm and wet place, using of chilling methods are recommend.

Key word:

Gas Turbine- Simulation- inlet air cooling- efficiency

تقدیم به روح پدرم استاد عبدالحسین عتیق و برادرم عنایت

آرزویم برگ بیدی بود، آن را باد برد
شادیم، شورم، نشاطم، عشقم از بنیاد برد

از دلم پر زد، رها شد، خسته بود از من گریخت
دور شد از پیش چشمانم، مرا از یاد برد

خواب بودم همچو بخت خفته‌ام در خواب مست
بی خبر آهوی زیبای مرا صیاد برد

در دلم جز آرزوی روی او دیگر نبود
وای از این دنیا که شیرین از کف فرهاد برد

رنج بردم، باغبانی کردمش تا غنچه بود
گل که شد، زیبا که شد، گلچین بد بنیاد برد

استاد عبدالحسین عتیق

و تقدیم به

مادر صبور و فداکارم

تشکر و قدردانی

برخود وظیفه می دانم اززحمات فراوان و بی دریغ استاد ارجمندم جناب آقای دکتر کریم مقصودی مهربان به عنوان استاد راهنما و جناب آقای دکتر کامران مبینی به عنوان استاد مشاور که با حوصله و صبر در طی مدت تحصیل و همچنین درانجام تمام مراحل این پایان نامه نهایت همکاری را با بنده داشته اند، تشکر وقدردانی نمایم .امیدوارم در کمال صحت و سلامت در عرصه علم و دانش موفقیت روز افزون کسب نمایند.

چکیده

توان و راندمان توربین های گازی با افزایش دما و رطوبت هوای محیط کاهش می‌یابد، کاهش توان خروجی به ویژه در فصل گرما که مصرف انرژی به حداکثر مقدار خود می‌رسد، مشکلات زیادی ایجاد می‌نماید. برای جبران این کاهش، از خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور استفاده می‌شود. بسته به شرایط اقلیمی، روش های مختلفی برای خنک‌کاری هوا به‌کار می‌رود که به طور خلاصه شامل روش های تبخیری، روش های تبریدی و سیستم های ذخیره ساز انرژی می‌باشند. پیش‌بینی عملکرد توربین گازی در شرایط خارج از نقطه طراحی (با تغییر شرایط محیطی یا سرمایش هوای ورودی)، نیازمند مدلسازی عملکرد تک‌تک اجزاء واحد گازی و ایجاد تطابق کاری بین اجزاء می‌باشد. در این پایان‌نامه، شبیه‌سازی عملکرد توربین گازی تک محوره همراه با سرمایش هوای ورودی، بر اساس روابط ترمودینامیکی مربوط به سیکل توربین گازی به منظور پیش بینی عملکرد توربین گازی در نقاط خارج از طرح انجام گرفته و تأثیر روش های خنک‌کاری هوای ورودی(تبخیری و تبریدی) در شرایط اقلیمی مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج مدلسازی توربین گازی Solar Centaur T4500 در مقایسه با اطلاعات واقعی خطای ناچیزی دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، در شرایط محیطی مردادماه (متوسط دمای بیشینه ۴۸/۲°C و رطوبت نسبی کمینه ۱۳٪)،کاهش توان و راندمان توربین گازی مربوطه نسبت به شرایط استاندارد بیش از ۲۸٪ می باشد.با توجه به نتایج حاصل از بررسی تأثیر سرمایش هوا،هرچه رطوبت نسبی محیط بیشتر باشد،کارایی روش های سرمایش تبخیری کاهش یافته و بر همین اساس در مناطق گرم و مرطوب استفاده از سیستم های تبریدی از نظر میزان افزایش توان خروجی،مناسب تر خواهد بود.

کلمات کلیدی:توربین گازی-شبیه سازی-سرمایش هوای ورودی-راندمان

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول – مقدمه و کلیات	**۱**
فصل دوم – مروری بر مطالعات انجام شده	**۶**
فصل سوم – اصول عملکرد توربینهای گازی	**۱۰**
۳-۱- ساختمان توربین گازی	**۱۱**
۳-۱-۱- کمپرسور	**۱۱**
۳-۱-۱-۱- کمپرسور گریز از مرکز	**۱۱**
۳-۱-۱-۲- کمپرسور محوری	**۱۲**
۳-۱-۲- محفظه احتراق	**۱۴**
۳-۱-۳- توربین	**۱۷**
۳-۲- مروری بر سیکلهای توربین گازی	**۲۰**
۳-۲-۱- سیکل ایده آل برایتون	**۲۰**
۳-۲-۲- سیکل عملی برایتون	**۲۲**
۳-۲-۳- سیکل باز	**۲۳**
۳-۲-۴- سیکل بسته	**۲۴**
۳-۲-۵- سیکلهای تک محوره و چند محوره	**۲۵**
۳-۳- عملکرد اجزاء توربین گازی و منحنی‌های مشخصه	**۲۶**
۳-۳-۱- عملکرد کمپرسور	**۲۶**
۳-۳-۲- عملکرد محفظه احتراق	**۲۹**
۳-۳-۳- عملکرد توربین	**۳۰**
۳-۳-۴- پیش‌بینی عملکرد توربین گازی	**۳۱**
۳-۴- عوامل محیطی مؤثر بر عملکرد توربین گازی	**۳۲**
۳-۴-۱- تاثیر دما بر عملکرد توربین گازی	**۳۲**
۳-۴-۲- تاثیر فشار بر عملکرد توربین گازی	**۳۳**
۳-۴-۳- تاثیر رطوبت بر عملکرد توربین گازی	**۳۴**
۳-۵- روشهای مدل‌سازی	**۳۵**

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل چهارم - خنک کاری هوای ورودی به توربین گازی	**۳۸**
۴-۱- ضرورت خنک کاری هوای ورودی به توربین	**۳۹**
۴-۲- روشهای خنک کاری هوای ورودی به توربینهای گازی	**۴۱**
۴-۲-۱- خنک کاری میانی	**۴۱**
۴-۲-۲- خنک کاری تبخیری	**۴۴**
۴-۲-۲-۱- سیستم ایرواشر	**۴۷**
۴-۲-۲-۲- سیستم خنک کاری تبخیری مدیا	**۵۰**
۴-۲-۲-۳- خنک‌کاری با فشار زیاد و ایجاد مه	**۵۳**
۴-۲-۳- سیستم‌های خنک‌کاری تبریدی	**۵۸**
۴-۲-۳-۱- سیستمهای تبرید تراکمی	**۵۹**
۴-۲-۳-۲- سیستمهای تبرید جذبی	**۶۵**
۴-۲-۳-۳- سیستمهای ذخیره‌ساز انرژی	**۷۱**
۴-۳- فن‌آوری‌های جدید در زمینهٔ افزایش توان خروجی توربین‌های گازی	**۷۴**
۴-۳-۱- تکنولوژی تراکم مرطوب	**۷۴**
۴-۳-۲- تزریق قطرات آب داغ	**۷۶**
۴-۳-۳- تکنولوژی	**۷۹**
۴-۳-۴- فن‌آوری	**۸۰**
فصل پنجم - شبیه سازی عملکرد توربین گازی	**۸۳**
۵-۱- مدل‌سازی عملکرد اجزاء	**۸۴**
۵-۱-۱- مدل‌سازی سیستمهای خنک‌کن ورودی	**۸۴**
۵-۱-۱-۱- سیستمهای تبخیری	**۸۴**
۵-۱-۱-۲- سیستمهای تبریدی	**۸۶**
۵-۱-۳- مدل سازی کمپرسور	**۸۷**
۵-۱-۴- مدل سازی محفظه احتراق	**۹۰**
۵-۱-۵- مدل سازی توربین	**۹۱**
۵-۱-۶- مدل سازی خنک کاری پره های توربین	**۹۱**

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۵-۱-۷- برقراری شرط گذر جرمی (تطابق عملکرد اجزاء)	**۹۲**
۵-۱-۸- محاسبات نهایی	**۹۳**
۵-۲- مدل سازی منحنی های مشخصه	**۹۵**
فصل ششم – بررسی عملکرد توربین گازی(Solar Centaur T4500)	**۱۰۰**
۶-۱- معرفی تلمبه خانه شهید چمران اهواز	**۱۰۱**
۶-۲- شرایط آب و هوای اهواز	**۱۰۶**
۶-۳- تحلیل سیکل توربین گازی	**۱۰۹**
۶-۳-۱- مقایسه نتایج مدل با اطلاعات واقعی در شرایط خارج ار نقطه طرح	**۱۱۱**
۶-۴- تاثیر سرمایش هوای ورودی	**۱۱۸**
۶-۵- نتیجه گیری	**۱۲۴**
۶-۶- پیشنهادات	**۱۲۶**

فهرست شکلها و نمودارها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- کاهش توان خروجی توربین گازی در اثر افزایش دمای محیط **۳**
شکل ۳-۱- کمپرسور گریز از مرکز **۱۲**
شکل ۳-۲- کمپرسور محوری **۱۴**
شکل ۳-۳- شماتیک یک نمونه محفظه احتراق **۱۵**
شکل ۳-۴- شماتیک یک نمونه محفظه احتراق حلقوی **۱۶**
شکل ۳-۵- شماتیک یک نمونه محفظه احتراق چندتایی **۱۷**
شکل ۳-۶- شماتیک یک نمونه توربین محوری چند مرحله ای **۱۹**
شکل ۳-۷- شماتیک یک توربین گازی صنعتی (سولار) **۱۹**
شکل ۳-۸- سیکل ایده آل برایتون **۲۰**
شکل ۳-۹- سیکل واقعی برایتون **۲۳**
شکل ۳-۱۰- سیکل باز توربین گازی **۲۴**
شکل ۳-۱۱- سیکل بسته توربین گازی **۲۴**
شکل ۳-۱۲- نمایی از سیکل ساده توربین گازی تک‌محوره **۲۵**
شکل ۳-۱۳- نمایی از سیکل ساده توربین گازی دومحوره **۲۵**
شکل ۳-۱۴- منحنی مشخصه کمپرسور جریان محوری **۲۸**
شکل ۳-۱۵- منحنی مشخصه توربین جریان محوری **۳۰**
شکل ۴-۱- منحنی مشخصه یک توربین گازی نمونه **۳۷**
شکل ۴-۲- شماتیک سیکل توربین گازی با خنک کن میانی **۴۰**
شکل ۴-۳- دیاگرام T-S سیکل برایتون با خنک کن میانی **۴۰**
شکل ۴-۴- نمودار سایکرومتریک و فرایندهای سرمایش **۴۳**
شکل ۴-۵- سیستم خنک کن ورودی **۴۴**
شکل ۴-۶- شماتیکی از قرارگیری سیستم خنک کن مدیا در سیکل توربین گازی **۴۹**

فهرست شکلها و نمودارها

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۷- نمائی از خنک‌کن تبخیری از نوع مدیا ۵۲
شکل ۴-۸- شماتیکی از نحوه قرارگیری سیستم تبخیری فاگ در سیکل توربین گازی ۵۴
شکل ۴-۹- نمونه ای از سیستم فاگ نصب شده ۵۵
شکل ۴-۱۰- نمونه نازل مورد استفاده در سیستم فاگ ۵۶
شکل ۴-۱۱- نمونه‌ای از نصب سیستمهای تبریدی ۵۹
شکل ۴-۱۲- دیاگرام سیکل تبرید تراکمی ۶۰
شکل ۴-۱۲- نمودار فشار - آنتالپی سیکل تبرید تراکمی ۶۱
شکل ۴-۱۳- شماتیکی از نحوه قرارگیری سیستم تبرید تراکمی مستقیم در سیکل توربین گازی ۶۴
شکل ۴-۱۴- شماتیکی از نحوه قرارگیری سیستم تبرید جذبی در سیکل توربین گازی ۶۶
شکل ۴-۱۵- شماتیکی از نحوه قرارگیری سیستم ذخیره‌ساز یخ در سیکل توربین گازی ۷۲
شکل ۴-۱۶- شماتیکی از نحوه قرارگیری سیستم ذخیره‌ساز آب سرد در سیکل توربین گازی ۷۳
شکل ۴-۱۷- گرمای نهان تبخیر آب به صورت تابعی از دما ۷۷
شکل ۴-۱۸- اندازه قطرات خروجی از نازلها، در حالت عادی و در حالت پاشش آب داغ ۷۸
شکل ۴-۱۹- سیکلTOPHAT ۷۹
شکل ۵-۱- نمودار سایکرومتریک و فرایندهای سرمایش ۸۵
شکل ۵-۲- مدل‌سازی خنک‌شدن تیغه‌های توربین ۹۳
شکل ۵-۳- منحنی مشخصه و خطوط Beta ۹۷
شکل ۵-۴- ذخیره دبی جرمی بدون بعد کمپرسور ۹۷
شکل ۵-۵- ذخیره نسبت فشار کمپرسور ۹۸
شکل ۵-۶- ذخیره راندمان ایزنتروپیک کمپرسور ۹۸

Abstract

Efficiency and output power of gas turbine decrease while temperature and humidity increase, the maximum loss is inn summer and result in a lot of problems. To compensate this loss, cooling of compressor inlet air is used. Depend in place and conditions of site, different method are used to achieve this target that briefly consist of vaporizing method, chilling method and storage method. Simulation of gas turbine items is necessary to predict the operation of gas turbine off-design. In this research paper, a single axle gas turbine in condition of off-design is used an effect of different method of cooling are considered. Result simulation of solar centaur T4500 in Ahwaz (the average maximum temperature 48.2 c and relative humidity 13%) exhibits decreasing 28% of output power. According to the results while relative humidity increases, performance of vaporizing method decreases, then in warm and wet place, using of chilling methods are recommend.

Key word:

Gas Turbine-Simulation-Inlet air cooling-Efficiency

Shahid Rajaee Teacher Training University

Faculty of mechanics

Simulation and thermodynamic analysis of the effect of cooling inlet air on a gas turbine performance working in khoozestan

By: Amir Hossein Atigh

Under Supervision of Dr.Karim Maghsoudi

Co-Supervision of Dr.Kamran Mobini

A thesis submitted to the graduate Studies Office in partial fulfillment of the requirements for the degree of MA in Mechanics

September ***2011***

دانشکده مکانیک

شبیه سازی و تحلیل ترمودینامیکی اثر سرمایش هوای ورودی بر افزایش راندمان یک سیکل توربین گازی در شرایط اقلیمی خوزستان

نگارش:
امیرحسین عتیق

استاد راهنما: دکتر کریم مقصودی مهربان

استاد مشاور: دکتر کامران مبینی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مکانیک(تبدیل انرژی)

شهریور ماه ۱۳۹۰

فصل اول

مقدمه و کلیات

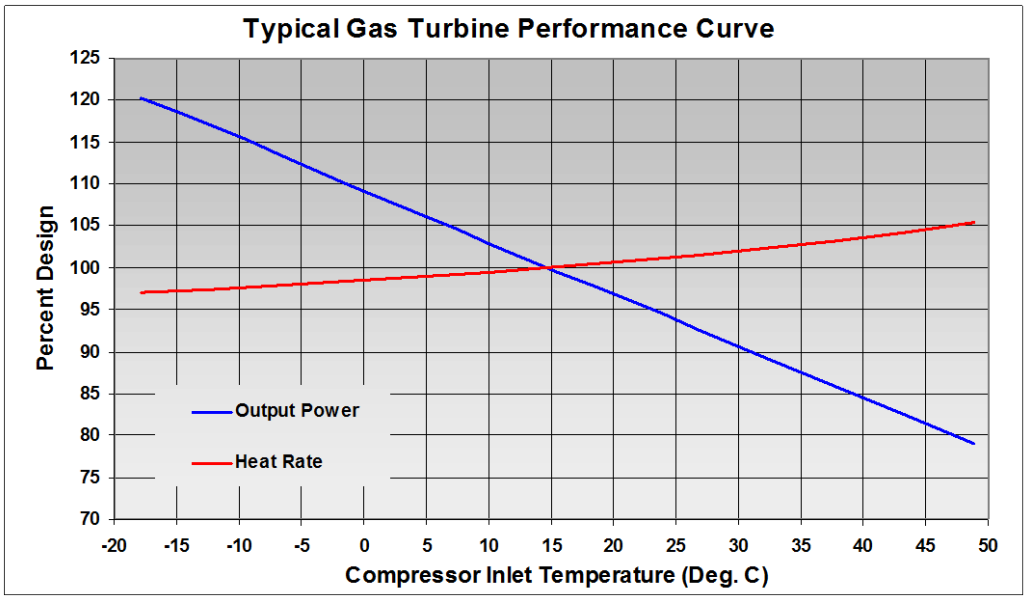
مقدمه

توربین های گازی به‌دلیل کاربرد وسیعی که در صنایع مختلف دارند، از اهمیت بسیار زیادی برخوردارند. کاربرد این نوع دستگاه، در سیستم های مختلف از جمله توربو ژنراتورها، توربو پمپ ها، توربوکمپرسورها،موشک ها و موتورهای هواپیما بسیار مشهود بوده و در حال گسترش و تکامل است.

این نوع توربین ها در یکی دو دهه اخیر به تعداد زیادی برای تولید برق چه به صورت تنها و چه با سیکل ترکیبی در کشورهای مختلف از جمله در ایران مورد استفاده قرار گرفته اند. بنابر آمار ارائه شده توسط وزارت نیرو، در ایران حدود ۲۷ درصد از ظرفیت نیروگاه های کشور متعلق به توربین های گازی می باشد.

چون توربین های گازی ماشین هایی هستند که مستقیماً از هوای آزاد تنفس می کنند، هر عاملی که باعث تغییر پارامترهای هوا گردد روی عملکرد توربین گازی نیز تأثیر خواهد گذاشت. از جمله عوامل مهمی را که در این راستا می توان بدان اشاره کرد، درجه حرارت هوای ورودی به کمپرسور توربین های گازی است. هرچه هوا گرمتر شود، چگالی آن کمتر شده و به عبارت دیگر، چنانچه یک حجم مشخص از هوا با دو دمای مختلف موجود باشد، جرم هوای خنک تر بیشتر است. از آنجایی که توربین های گازی با دور ثابت کار می کنند، حجم هوای ورودی به کمپرسور آنها همواره ثابت است. در نتیجه، هرچه هوا گرم تر شود، جرم عبوری از مجموعه کاهش یافته و قدرت خروجی توربین نیز که رابطهٔ مستقیم با دبی جرمی عبوری از آن دارد کم می شود. از طرف دیگر، فشردن هوای گرم نیاز به صرف انرژی بیشتری دارد. بنابراین هرچه هوا گرم تر می شود، انرژی مورد نیاز کمپرسور برای فشردن آن بیشتر شده و انرژی کمتری در محور توربین برای تبدیل به انرژی الکتریکی باقی می ماند. این دو عامل روی هم باعث می گردند که با گرم شدن هوا، قدرت خروجی توربین های گازی کاهش یابد.

منحنی تغییرات مگاوات خروجی نسبت به دمای محیط برای یک توربین گاز نمونه در شکل ۱-۱ نمـایش داده شده است.



شکل ۱-۱- کاهش توان خروجی توربین گازی در اثر افزایش دمای محیط[۱]

به علت اینکه کشور ما در منطقهٔ گرم واقع شده است، تقریباً تمام توربین های گازی با این مسأله مواجـه هستند. این مشکل به حدی است که قدرت تولیدی نیروگاه های گازی و سیکل ترکیبی در فصول گرم سال، حدود ۱۳۰۰ مگاوات کمتر از قدرت آنها در بقیهٔ فصول است. به عبارت دیگر، از سرمایه گذاری انجـام شـده برای این میزان قدرت در مدت بیش از $\frac{1}{4}$ طول سال نمی توان استفاده نمود و این درست در حالی است که بیشترین تقاضا برای مصرف برق نیز در این فصل اتفاق می افتد. مبارزه با این مشکل جـدی (افـت تـوان در فصل گرم) می تواند به افزایش بهره وری از این تجهیزات گرانقیمت منجر شود.

یکی از روش هایی که برای بهبود عملکرد توربین های گازی مورد توجه فراوان قرار گرفته است، استفاده از سرمایش هوای ورودی به کمپرسور توربین گازی می‌باشد. تقریباً بـه ازای هریـک درجـه سـانتیگراد کـاهش دمای هوا، توان خروجی به میزان ۰/۵ تا ۱ درصد افزایش خواهد یافت. این روش با این که قـدمتی بـیش از ۲۵ سال دارد اما تنها حدود ۱۵ سال است که به عنوان یک روش مطمئن و صـنعتی بـرای افـزایش قـدرت

خروجی توربین های گازی به کار گرفته می شود. طبق گزارش های موجـود، تـاکنون بـیش از ۷۰۰ واحـد توربین گازی در دنیا به انواع سیستم های مختلف خنک کردن هوای ورودی مجهز گردیده اند که این مقدار حدود ۳ برابر تعداد کل واحدهای گازی و سیکل ترکیبی موجود در شبکهٔ برق ایران است.

به طور کلی روش های خنک‌کاری دو دسته‌اند: سیستم های خنک‌کن تبخیری (مانند مه پاش، ایرواشر و مدیا) که برای نواحی گرم و خشک مناسبند، اما به دلیل مصرف آب زیاد در این سیستم ها، استفاده از آنها در مناطق بدون آب با مشکلات فراوانی همراه است. روش دیگر خنک‌کاری به کمک سیستم های خنک‌کن تبریدی (چیلر جذبی و چیلر تراکمی) می‌باشد. استفاده از چیلرها به دلیل مصرف برق بالا در آنهـا و هزینـه زیاد نیاز به بررسی اقتصادی دارد. در صورتی که از نظر اقتصادی قابل قبول باشد، به خاطر وجود گاز طبیعی در اغلب نیروگاه ها، استفاده از چیلرهای جذبی با کندانسور آبی می‌تواند انتخابی مناسب باشد. علاوه بر این می توان از گازهای داغ خروجی توربین با دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد به‌عنوان منبع بـالقوه حـرارت برای تولید بخار مصرفی چیلر استفاده نمود.

با توجه به مشکلات و راه‌حل های ارائه شده، ضـرورت دارد روش هـای مختلـف خنـک‌کـاری هـوای ورودی با توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه از لحاظ فنی بررسی شده و روش مناسـبی جهـت خنـک‌کـاری هوای ورودی توربین گازی انتخاب گردد. بدیهی است مناسب ترین روش جهت انجام مطالعات و بررسی‌های لازم، شبیه‌سازی رفتار توربین در شرایط واقعی می‌باشد. شبیه‌سازی عملکرد تـوربین گـازی راهـی مناسـب جهت بررسی تأثیر شرایط محیطی بر پارامترهای خروجی توربین گاز (توان و راندمان) می‌باشد. شبیه‌سـازی بر اساس مدل‌سازی منحنی‌های مشخصه و همچنین مدل‌سازی عملکـرد تـک‌تـک اجـزاء بـه کمـک روابـط ترمودینامیکی حاکم بر سیکل های توربین گازی، انجام می‌شود.

با توجه به موارد ذکر شده، در فصل دوم این پایان نامه، نمونه‌هایی از تحقیقات و مطالعات انجام شـده در زمینه عملکرد توربین های گازی بیان می‌شود.