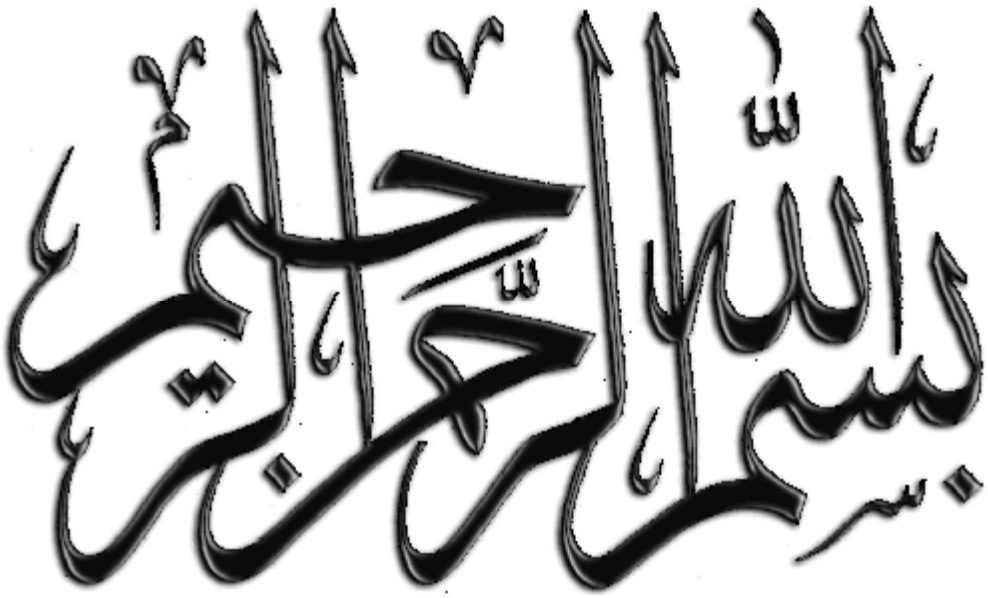

بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای روزبه پرهیزکارخدیو پایان نامه ٦ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی عددی پاشش مه در هوای ورودی به توربین گاز در تاریخ ۱۳۸۸/۷/۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمدرضا انصاری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر فتح اله امی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر بهزاد قدیری دهکردی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر عزیز عظیمی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر فتح اله امی	استادیار	

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته **مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی** است که در سال **۱۳۸۸** در دانشکده **فنی و مهندسی** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای **دکتر محمدرضا انصاری** از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **روزبه پرهیزکارخدیو** دانشجوی رشته **مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **روزبه پرهیزکارخدیو**

تاریخ و امضا: ۸۸/۸/۲۴

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی: **روزبه پرهیزکارخدیو**

امضاء:

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مکانیک
گروه تبدیل انرژی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

شبیه سازی عددی پاشش مه در هوای ورودی به توربین گاز

نگارنده:
روزبه پرهیزکار خدیو

استاد راهنما:
جناب آقای دکتر محمدرضا انصاری

شهریور ۱۳۸۸

چکیده

یکی از معایب مهم توربین گاز تأثیرپذیری آن از شرایط محیطی عملکرد است و در این میان دمای محیط دارای بیش‌ترین تأثیر است. با بالا رفتن دمای محیط هم توان خروجی و هم راندمان توربین گاز کاهش پیدا می‌کند. یکی از بهترین و کاربردی‌ترین روش‌ها برای جبران اثرات منفی افزایش دما، پاشش مه (ذرات بسیار ریز آب) در هوای ورودی توربین گاز است. این ذرات تبخیر شده و با دریافت گرمای لازم از جریان هوا طی فرایند سرمایش تبخیری، موجب کاهش دمای جریان هوای ورودی به توربین گاز می‌شوند. در بررسی پیش رو به شبیه سازی عددی پاشش مه در جریان هوای ورودی به توربین گاز پرداخته شده و از این طریق تأثیر عوامل مختلف بر کارکرد سیستم مورد بحث قرار می‌گیرد. به این منظور معادلات بقای جرم، ممنتوم (دوبعدی) و انرژی برای فاز پیوسته (جریان هوا) در نظر گرفته شده است. همچنین معادله انتقالی برای میزان بخار آب موجود در هوا به کار گرفته شده است. تأثیر پاشش مه در عبارات منبع این معادلات وارد می‌شوند. مجموع این پنج معادله به همراه دو معادله برای مدل سازی جریان آشفته (مدل k-ε استاندارد) با استفاده از الگوریتم SIMPLE حل شده و آنالیز حساسیتی با تغییر پارامترهای دمای محیط، رطوبت نسبی محیط، قطر قطرات مه و سرعت جریان هوا انجام پذیرفته است. این آنالیزها نشان خواهند داد که با افزایش دمای محیط، کاهش رطوبت نسبی محیط، کاهش قطر قطرات مه و افزایش سرعت جریان هوا سیستم پاشش مه دارای عملکرد مطلوب‌تری خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: توربین گاز، خنک‌سازی هوای ورودی، پاشش مه، شبیه سازی عددی

فهرست مطالب

چکیده ..... أ
فهرست مطالب ..... ب
فهرست شکل‌ها و نمودارها ..... د
فهرست جدول‌ها ..... ز
فهرست نشانه‌ها ..... ح
فصل اول ۱
مروری بر سیکل ترمودینامیکی توربین گاز ۱
مقدمه ۱
۱-۱- مروری بر سیکل ترمودینامیکی توربین گاز ۴
مراجع ۱۰
فصل دوم ۱۱
بررسی تأثیر شرایط محیطی بر عملکرد توربین گاز ۱۱
مقدمه ۱۱
۲-۱- تأثیر شرایط محیطی بر عملکرد سیکل توربین گاز ۱۲
۲-۲- تأثیر دمای محیط بر عملکرد توربین گاز ۱۳
۲-۳- تأثیر فشار محیط بر عملکرد توربین گاز ۲۰
۲-۴- تاثیر رطوبت نسبی هوای محیط بر عملکرد توربین گاز ۲۵
نتیجه گیری ۳۱
فصل سوم ۳۲
روش‌های خنک‌سازی هوای ورودی به توربین گاز ۳۲
با تمرکز بر سیستم پاشش مه ۳۲
مقدمه ۳۲
۳-۱- روش‌های غیرتبخیری ۳۳
۳-۱-۱- سیستم‌های ذخیره‌سازی ۳۳
۳-۱-۲- سیستم‌های تبرید تراکمی ۳۴
۳-۱-۳- سیستم‌های تبرید جذبی ۳۵
۳-۲- روش های مبتنی بر سرمایش تبخیری ۳۶
۳-۲-۱- تغییرات روزانه دمای حباب تر، دمای حباب خشک و رطوبت نسبی ۳۹
۳-۲-۲- کولر تبخیری ۴۰
۳-۲-۳- سیستم پاشش مه ۴۱
۳-۳- تاریخچه مطالعات انجام شده پیرامون روش‌های خنک‌سازی هوای ورودی به توربین گاز ۴۷
مراجع ۵۰
فصل چهارم ۵۲
معادلات و روش‌های حاکم بر شبیه سازی عددی پاشش مه در جریان هوای ورودی به توربین گاز ۵۲
مقدمه ۵۲

۴-۱- معادلات حاکم بر جریان (فاز پیوسته) ۵۴
۴-۲- معادلات مربوط به ذرات مه (فاز ناپیوسته) ۵۵
۴-۲-۱- انتقال جرم و عبارت منبع معادله بقای جرم ۵۶
۴-۲-۲- تأثیر نیروهای اینرسی و ائرودینامیکی و عبارت منبع معادله(های) بقای ممنتوم ۵۶
۴-۲-۳- انتقال گرما و عبارت منبع معادله بقای انرژی ۵۷
۴-۳- معادلات مربوط به مدل سازی جریان آشفته ۵۷
۴-۴- روش هایبرید برای گسسته سازی معادلات ۵۹
۴-۵- استفاده از الگوریتم SIMPLE برای حل هم‌زمان سرعت و فشار ۶۰
۴-۵-۱- معادلات ممنتوم ۶۱
۴-۵-۲- معادله تصحیح فشار ۶۲
۴-۵-۳- تعیین مقادیر جدید کمیت ها با استفاده از تصحیح فشار ۶۳
۴-۵-۴- الگوریتم SIMPLE ۶۳
۴-۵-۵- استفاده از URF ۶۴
۴-۶- محاسبه‌ی فشار اشباع آب بر حسب دمای اشباع آن ۶۵
۴-۷- محاسبه‌ی گرمای نهان تبخیر آب بر حسب دمای آن ۶۶
مراجع ۶۷
فصل پنجم ۶۸
بررسی نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی پاشش مه در جریان هوای ورودی به توربین گاز ۶۸
مقدمه ۶۸
۵-۱- بررسی صحت کد ۷۰
۵-۲- بررسی استقلال جواب‌های ارائه شده از شبکه حل ۷۱
۵-۳- حالت پایه ۷۲
۵-۴- بررسی تأثیر دمای هوای محیط ۷۷
۵-۵- بررسی تأثیر رطوبت نسبی محیط ۸۲
۵-۶- بررسی تأثیر سرعت جریان هوای ورودی ۸۵
۵-۷- بررسی تأثیر قطر قطرات مه ۹۰
۵-۸- بررسی تأثیر فشار هوای محیط ۹۳
۵-۹- بررسی صحت نتایج به دست آمده ۹۷
جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی ۹۸
مراجع ۹۸
Abstract

فهرست شکل‌ها و نمودارها

شکل (۱-۱). تئوری کلی موتورهای توربینی احتراقی ۲
شکل (۱-۲). نمایش شماتیک یک مولد گاز ۳
شکل (۱-۳). توربین گاز تک محوری با سیکل ساده ۵
شکل (۱-۴). سیکل ساده توربین گاز ۶
شکل (۱-۵). تغییرات توان و راندمان سیکل شکل (۱-۳) بر حسب نسبت فشار ۹
شکل (۲-۱). طرح شماتیک توربین گاز ۱۳
شکل (۲-۲). تاثیر افزایش دمای هوای ورود بر عملکرد سیکل توربین گاز در نمودار T-S ۱۴
شکل (۲-۳). تغییرات دبی هوای ورودی به کمپرسور بر حسب دمای محیط ۱۴
شکل (۲-۴). تغییرات نسبت فشار کمپرسور بر حسب دمای محیط ۱۵
شکل (۲-۵). بررسی مفهومی تاثیر دمای محیط بر نسبت فشار کمپرسور ۱۶
شکل (۲-۶). تغییرات توان خالص خروجی سیکل توربین گاز بر حسب دمای محیط ۱۷
شکل(۲-۷). تغییرات دبی سوخت مصرفی سیکل توربین گاز بر حسب دمای محیط ۱۸
شکل(۲-۸). تغییرات راندمان سیکل توربین گاز بر حسب دمای محیط ۱۹
شکل (۲-۹). تأثیر دمای محیط بر عملکرد توربین گاز Siemens V94.2 ..... ۱۹
شکل (۲-۱۰). تغییرات فشار هوای محیط با ارتفاع ۲۱
شکل (۲-۱۱). تغییرات دبی هوای ورودی به کمپرسور توربین گاز Siemens V94.2 با تغییرات فشار محیط ۲۲
شکل (۲-۱۲). تغییرات دبی سوخت توربین گاز Siemens V94.2 با تغییرات فشار محیط ۲۳
شکل (۲-۱۳). تغییرات توان توربین گاز Siemens V94.2 با تغییرات فشار محیط ۲۳
شکل (۲-۱۴). تاثیر فشار محیط بر عملکرد توربین گاز Siemens V94.2 ..... ۲۴
شکل (۲-۱۵). تغییرات دبی هوای ورودی به کمپرسور توربین گاز Siemens V94.2 بر حسب رطوبت نسبی ۲۵
شکل (۲-۱۶). تاثیر رطوبت نسبی بر مصرف سوخت توربین گاز Siemens V94.2 ..... ۲۶
شکل (۲-۱۷). تاثیر رطوبت نسبی بر توان توربین گاز Siemens V94.2 ..... ۲۷
شکل (۲-۱۸). تاثیر رطوبت نسبی بر راندمان توربین گاز Siemens V94.2 ..... ۲۸
شکل (۲-۱۹). تاثیر رطوبت نسبی بر دمای خروجی ازتوربین توربین گاز Siemens V94.2 ..... ۲۸
شکل (۲-۲۰). تاثیر رطوبت نسبی بر دبی گاز گذری ازتوربین توربین گاز Siemens V94.2 ..... ۲۹
شکل (۲-۲۱). تاثیر رطوبت نسبی بر عملکرد توربین گاز Siemens V94.2 ..... ۳۰
شکل (۳-۱). یک سیستم تبرید جذبی ساده ۳۶
شکل (۳-۲). فرایند اشباع آدیاباتیک ۳۸
شکل (۳-۳). تغییرات دمای حباب خشک، دمای حباب ترو رطوبت نسبی ۴۰
شکل (۳-۴). نمایش چگونگی خنک کاری هوای ورودی به کمپرسور با استفاده از سیستم پاشش مه ۴۲
شکل (۳-۵). نمایی از نازل به کار رفته در سیستم پاشش مه ۴۲

شکل (۳-۶). تاثیر سیستم پاشش مه بر دمای هوای ورودی بر کمپرسور ۴۳
شکل (۳-۷). تاثیر سیستم پاشش مه بر دبی هوای ورودی کمپرسور توربین گاز Siemens V94.2 ۴۳
شکل (۳-۸). تاثیر سیستم پاشش مه بر توان توربین گاز Siemens V94.2 ۴۴
شکل (۳-۹). تأثیر سیستم پاشش مه بر راندمان توربین گاز Siemens V94.2 ۴۴
شکل (۳-۱۰). چگونگی پیاده سازی درست سیستم پاشش مه ۴۵
شکل (۳-۱۱). میزان مصرف آب سیستم پاشش مه برای توربین گاز Siemens V94.2 ۴۶
شکل (۳-۱۲). تاثیر رطوبت هوای محیط بر کارایی سیستم پاشش مه برای توربین گاز Siemens V94.2 ۴۶
شکل (۴-۱). شبکه حل جابه‌جا شده ۵۴
شکل (۵-۱) نمای شماتیک کانال ۶۹
شکل (۵-۲). توزیع دما برای جریان تحت تأثیر نیروی شناوری ۷۰
شکل (۵-۳). توزیع دما در طول کانال (بررسی عدم وابستگی حل به شبکه) ۷۱
شکل (۵-۴). توزیع دمای جریان در طول کانال ۷۳
شکل (۵-۵). توزیع دمای جریان در طول کانال ۷۴
شکل (۵-۶). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال ۷۴
شکل (۵-۷). توزیع سرعت جریان در طول کانال ۷۵
شکل (۵-۸). توزیع فشار جریان در طول کانال ۷۵
شکل (۵-۹). توزیع دمای مه ۷۶
شکل (۵-۱۰). توزیع دمای جریان در طول کانال برای دمای محیط ۴۵°C ۷۷
شکل (۵-۱۱). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای دمای محیط ۴۵°C ۷۸
شکل (۵-۱۲). توزیع دمای جریان در طول کانال برای دماهای محیط ۲۵°C و ۴۵°C ۷۸
شکل (۵-۱۳). میزان کاهش دمای جریان در طول کانال برای دماهای محیط ۲۵°C و ۴۵°C ۷۹
شکل (۵-۱۴). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای دماهای محیط ۲۵°C و ۴۵°C ۸۰
شکل (۵-۱۵). میزان افزایش کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای دماهای محیط ۲۵°C و ۴۵°C ۸۰
شکل (۵-۱۶). میزان کاهش دمای جریان در طول کانال برای شرایط مختلف محیطی ۸۱
شکل (۵-۱۷). میزان افزایش کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای شرایط مختلف محیطی ۸۱
شکل (۵-۱۸). توزیع دمای جریان در طول کانال برای رطوبت نسبی محیط ٪۳۰ ۸۲
شکل (۵-۱۹). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای رطوبت نسبی محیط ٪۳۰ ۸۳
شکل (۵-۲۰). توزیع دمای جریان در طول کانال برای رطوبت نسبی محیط ٪۶۰ و ٪۳۰ ۸۳
شکل (۵-۲۱). میزان کاهش دمای جریان در طول کانال برای رطوبت نسبی محیط ٪۶۰ و ٪۳۰ ۸۴

شکل (۵-۲۲). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای رطوبت نسبی محیط ٪۶۰ و ٪۳۰ ۸۴
شکل (۵-۲۳). میزان افزایش کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای رطوبت نسبی محیط ٪۶۰ و ٪۳۰ ۸۵
شکل (۵-۲۴). توزیع دمای جریان در طول کانال برای سرعت جریان هوای ورودی ۲۰m/s ۸۶
شکل (۵-۲۵). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای سرعت جریان هوای ورودی ۲۰m/s ۸۷
شکل (۵-۲۶). توزیع دمای جریان در طول کانال برای سرعت جریان هوای ورودی ۱۰m/s و ۲۰m/s ۸۷
شکل (۵-۲۷). میزان کاهش دمای جریان در طول کانال برای سرعت جریان هوای ورودی ۱۰m/s و ۲۰m/s ۸۸
شکل (۵-۲۸). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای سرعت جریان هوای ورودی ۱۰m/s و ۲۰m/s ۸۹
شکل (۵-۲۹). میزان افزایش کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای سرعت جریان هوای ورودی ۱۰m/s و ۲۰m/s ۸۹
شکل (۵-۳۰). توزیع دمای جریان در طول کانال برای قطر قطرات ۲۰ میکرون ۹۰
شکل (۵-۳۱). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای قطر قطرات ۲۰ میکرون ۹۱
شکل (۵-۳۲). توزیع دمای جریان در طول کانال برای قطر قطرات ۵۰ و ۲۰ میکرون ۹۱
شکل (۵-۳۳). میزان افزایش دمای جریان در طول کانال برای قطر قطرات ۵۰ و ۲۰ میکرون ۹۲
شکل (۵-۳۴). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای قطر قطرات ۵۰ و ۲۰ میکرون ۹۲
شکل (۵-۳۵). میزان افزایش کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال برای قطر قطرات ۵۰ و ۲۰ میکرون ۹۳
شکل (۵-۳۶). توزیع دمای جریان در طول کانال در ارتفاع ۲۰۰۰m ۹۴
شکل (۵-۳۷). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال در ارتفاع ۲۰۰۰m ۹۴
شکل (۵-۳۸). توزیع دمای جریان در طول کانال در ارتفاع های ۰ و ۲۰۰۰m ۹۵
شکل (۵-۳۹). میزان افزایش دمای جریان در طول کانال در ارتفاع های ۰ و ۲۰۰۰m ۹۵
شکل (۵-۴۰). توزیع کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال در ارتفاع های ۰ و ۲۰۰۰m ۹۶
شکل (۵-۴۱). میزان افزایش کسر جرمی بخار آب جریان در طول کانال در ارتفاع های ۰ و ۲۰۰۰m ۹۶
شکل (۵-۴۲). توزیع دمای میانگین در طول کانال ۹۷

فهرست جدول‌ها

جدول (۲-۱). مشخصات توربین گاز Siemens V94.2 ..... ۱۲
جدول (۴-۱). ضرایب معادلات مدل آشفتگی (k-ε) ۵۸
جدول (۴-۲). عبارات F و D مورد استفاده در روش هایبرید ۶۰
جدول (۴-۳). ضرایب ثابت مورد استفاده در تعیین فشار اشباع آب ۶۶
جدول (۴-۴). گرمای نهان تبخیر آب بر حسب دمای آن ۶۶
جدول (۵-۱). سرمایش تبخیری از نوع پاشش مه در کانال ۹۷

فهرست نشانه‌ها

- نشانه‌های انگلیسی

عدد پرانتل	Pr	مساحت (m^2)	A
انتقال گرمای ویژه (kJ/kg)	q	دمای ورودی کمپرسور (K)	CIT
نرخ انتقال گرما (W)	$\dot{Q}$	گرمای ویژه فشار ثابت (kJ/kg.K)	C_P
نسبت فشار کمپرسور (-)	r	ضریب پسا (-)	C_D
ثابت گاز (kJ/kg.K)	R	قطر (m)	d
ثابت جهانی گازها (J/mol.K)	R_0	ضریب نفوذ جرم (m^2/s)	D
عدد رینولدز	Re	ضریب تأثیر (-)	e
عبارت منبع	S	نسبت هوا به سوخت (-)	f
عدد اشمیت	Sc	ضریب جابه‌جایی	F
عدد شروود	Sh	عبارت منبع معادلات ممنتوم	F
زمان (s)	t	ضریب گرانش (m/s^2)	g
دما (K یا °C)	T	انتالپی ویژه (kJ/kg)	h
سرعت در راستای x (m/s)	u	ضریب رسانایی (W/m.K)	k
سرعت در راستای y (m/s)	v	انرژی جنبشی آشفتگی	k
حجم ویژه (m^3/kg)	v	ضریب انتقال جرم	k_c
سرعت (m/s)	V	جرم (kg)	m
دبی حجمی (m^3/s)	$\dot{V}$	دبی جرمی (kg/s)	$\dot{m}$
سرعت در راستای z (m/s)	w	جرم مولکولی (kg/kmol)	M
کار ویژه (kJ/kg)	w	سرعت چرخشی (rpm)	N
کار (W)	$\dot{W}$	عدد ناسلت	Nu
نسبت دماهای خروجی به ورودی کمپرسور (-)	x	فشار (Pa)	P
کسر جرمی بخار آب (-)	Y	مقدار تصحیح فشار (Pa)	P'

- نشانه‌های لاتین

تلفات گرمایی	μφ	Under Relaxation Factor	α
لزجت دینامیکی (-)	ν	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی	ε
چگالی (kg/m^3)	ρ	بازده	η
تانسور تنش برشی	τ	نسبت دمای ورودی توربین به دمای محیط (-)	θ
		لزجت سینماتیکی ()	μ

- زیرنویس‌ها

جرم	M	ورودی کمپرسور	1
قطره	P	خروجی کمپرسور	2
فشار	p	ورودی توربین	3
حالت اشباع	s	هوا	a
حالت اشباع	sat	هوا	air
آشفتگی	t	نیروی پسا	D
دما	T	حباب خشک	DB
سرعت در راستای x	u	مؤثر	eff
سرعت در راستای y	v	نهان	fg
سرعت در راستای z	w	نیروی گرانش	G
آب	w	انرژی	H
حباب تر	WB	شرایط استاندارد	iso

- بالا نویس‌ها

شماره تکرار k مقدار حدسی *

فصل اول

مروری بر سیکل ترمودینامیکی توربین گاز

مقدمه

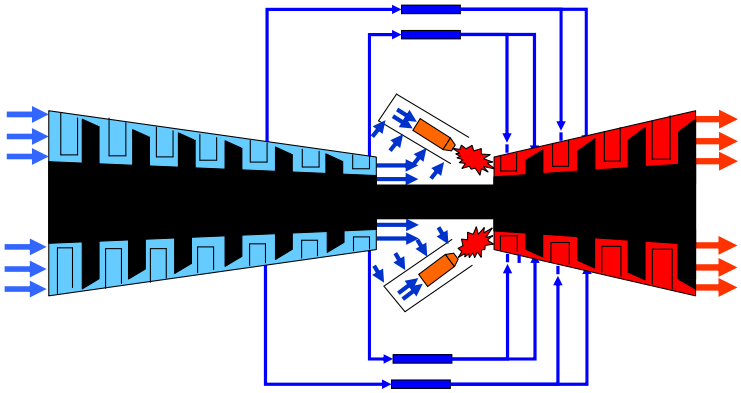
تئوری کلی حاکم بر هسته اصلی همه موتورهای توربینی احتراقی در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود هوا توسط کمپرسور پس از مکیده شدن با صرف توان فشرده می‌شود. این هوای فشرده اگر مستقیماً وارد توربین شود حداکثر به اندازه همان توان مصرف شده در کمپرسور توان تولید خواهد کرد. از این رو برای دریافت توان خالص از این مجموعه، در محفظه احتراق در اثر فرآیند احتراق هوای فشرده به گاز داغ و فشرده تبدیل می‌شود. حال این گاز فشرده می‌تواند در طی فرآیند انبساط در توربین علاوه بر توان مصرفی کمپرسور توان اضافی برای تولید انرژی الکتریکی، کار محوری و یا پیش‌رانش ایجاد کند.

شکل (۱-۱). تئوری کلی موتورهای توربینی احتراقی

موتورهای توربینی بسیار متنوع هستند و دلیل این تنوع نیز کاربردهای متنوع این موتورهاست. کاربرد موتورهای توربینی را می‌توان در سه دسته کلی تولید انرژی الکتریکی، تولید کار محوری و نیز تولید پیش‌رانش تقسیم بندی کرد. اگرچه ساختارهای متفاوتی را در هر یک از موتورهای تقسیم شده در سه بخش می‌توان مشاهده کرد ولی هسته اصلی سازنده همه موتورهای توربینی احتراقی که به نام مولد گاز[۱] شناخته می‌شود، در همگی وجود دارد. از این ساختار که طبق شکل (۱-۲) نیز مشخص است، گاز نسبتاً داغ و نسبتاً پرفشار تولید می‌شود که در خروجی بخش توربین نشان داده شده است. توجه شود که هیچ توان خالصی در این جا تولید نمی‌شود و تمام توان تولید شده درتوربین توسط کمپرسور مصرف می‌شود. حال اگر چند ردیف دیگر به بخش توربین توربین گاز اضافه شود، یک موتور تولید توان به دست می‌آید که البته با توجه به این که ردیف‌های اضافه شده به توربین روی همان محور[۲] پیشین باشند یا محور جدید، کاربردهای متفاوتی را می‌توان از توربین گاز به دست آمده انتظار داشت. مثلاً برای توربین‌های تولید انرژی الکتریکی که به یک ژنراتور متصل می‌شوند و قرار است که با یک دور ثابت (غیر از حالت گذرا) بهره‌برداری

[1] Gas Generator
[2] Shaft

شوند، معمولاً همه مراحل انبساط گاز در یک توربین و روی یک محور انجام می‌شود. توربین‌هایی مانند Siemens V94.2 و GE9171E از این دسته‌اند (دسته نخست).



شکل (۱-۲). نمایش شماتیک یک مولد گاز

اما اگر بنا باشد که این توربین گاز تأمین کننده توان مورد نیاز برای یک کمپرسور ایستگاه تقویت فشار گاز و یا پروانه یک کشتی و یا هر مصرف کننده دیگر توان باشد که در طیف وسیعی از تغییرات دور بهره‌برداری می‌شود، آن‌گاه برای جلوگیری از محدودیت عملکرد و پدیدار شدن مسائل حساسی چون تناسب بین مصرف کننده و توربین گاز، بخش اضافی توربین بر روی یک محور جدید نصب می‌شود. این بخش اضافی توربین معمولاً "توربین توان"[۳] نامیده می‌شود. توربین توان بدون این که اتصال مکانیکی با مولد گاز داشته باشد، طبق دینامیک اعمالی از سمت مصرف کننده توان لازم را تولید می‌کند. البته بخش مولد گاز نیز باید طبق نیاز مصرف کننده، گاز لازم را از نظر دبی، دما و فشار برای توربین توان تأمین کند. واضح است که از این دسته از موتورهای توربینی برای بهره برداری در دور ثابت مثل تولید الکتریسیته نیز می‌توان استفاده کرد. در واقع تولید توان با دور ثابت یک حالت خاص دور متغیر است. موتورهایی چون GT10B و نیز سری توربین های LM محصول کمپانی GE از این دسته هستند (دسته دوم).

[3] Power Turbine

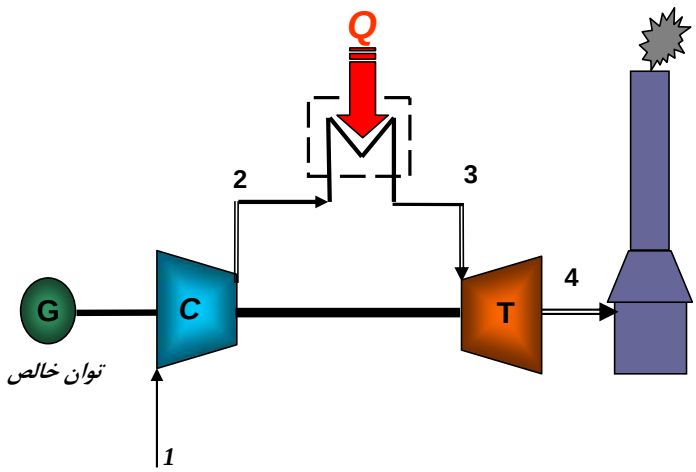
دسته سوم موتورهای توربینی که برای تولید پیش‌رانش در صنایع هوا فضا به کار می‌روند، در چهار نوع توربوجت[۴]، توربوفن[۵]، توربوپراپ[۶] و توربوشفت[۷] می‌باشند. توربوشفت که به عنوان موتور هلی‌کوپتر و نیز موتور تانک کاربرد دارد، دارای ساختاری مشابه موتورهای دسته دوم است.

همان گونه که پیش از این نیز بیان شد، با وجود تنوع موتورهای توربینی، اساس عملکرد آن ها بر پایه ساختار شکل (۱-۲) می‌باشد. از این رو و نیز با توجه به این که در پایان‌نامه حاضر به توربین‌های گاز نیروگاهی پرداخته شده است، تنها موتورهای توربینی دسته نخست که به نام توربین‌های گاز تولید انرژی الکتریکی شناخته می‌شوند مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۱-۱- مروری بر سیکل ترمودینامیکی توربین گاز

دیاگرام شماتیک یک توربین گاز تک محوری با سیکل ساده در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. هوا در نقطه ۱ و در شرایط محیط وارد کمپرسور جریان محوری می‌شود. از آن جایی که این شرایط در روزها و ساخت‌گاه[۸]های مختلف متفاوت است، بهتر است به منظور مقایسه، شرایط استانداردی در نظر گرفته شود. شرایط استاندارد مورد استفاده برای توربین‌های گاز دمای ۱۵°C، فشار ۱/۰۱۳ bar و رطوبت نسبی ٪ ۶۰ می باشد که توسط سازمان بین المللی استانداردها (ISO) تعیین شده‌اند و معمولاً با عنوان شرایط ISO از آن‌ها یاد می‌شود [2].

[4] Turbojet
[5] Turbofan
[6] Turboprop
[7] Turbo shaft
[8] Site



شکل (۱-۳). توربین گاز تک محوری با سیکل ساده

برای این که بتوانیم یک سیکل ایده‌آل به منظور بررسی ترمودینامیکی توربین گاز تعریف کنیم، لازم است فرض‌های ساده کننده‌ای در نظر گرفته شود [1]:

۱- فرایندهای تراکم و انبساط آدیاباتیک و برگشت‌پذیر، یعنی آیزنتروپیک، در نظر گرفته می‌شوند.

۲- تغییرات انرژی جنبشی سیال بین ورودی و خروجی هر یک از اجزا (یعنی کمپرسور، محفظه احتراق و توربین) قابل صرف‌نظر است.

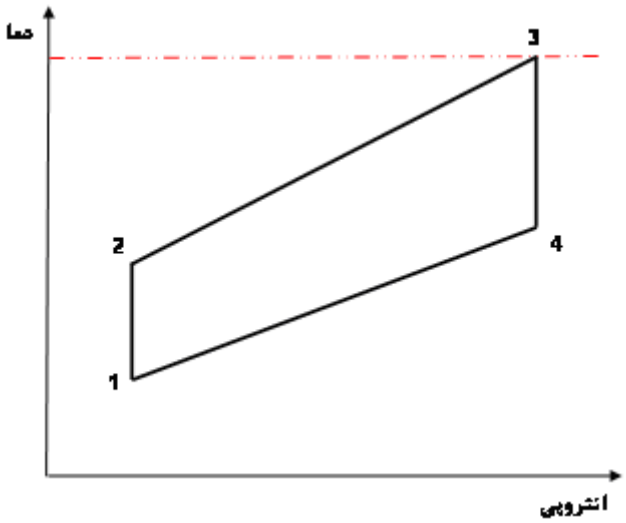
۳- در مجرای ورودی، محفظه احتراق، مبدل‌های حرارتی، خنک‌کن‌های میانی، مجرای خروجی و مجراهای مرتبط کننده اجزا افت فشار وجود ندارد.

۴- سیال در کل سیکل دارای ترکیب شیمیایی یکسانی است و گاز کامل با ظرفیت حرارتی ویژه ثابت در نظر گرفته می‌شود..

۵- دبی جرمی گاز در کل سیکل ثابت است.

۶- انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی به صورت "کامل" انجام می‌شود و افزایش دمای قسمت سردتر، حداکثر مقدار ممکن است و دقیقاً برابر با افت دمای بخش گرم‌تر است.

با در نظر گرفتن فرض‌های بالا می‌توان سیکل ساده توربین گاز را روی دیاگرام دما- انتروپی به شکل زیر نمایش داد:



شکل (۱-۴). سیکل ساده توربین گاز

- **کمپرسور:** در این بخش هوا پس از مکیده شدن در طی چند مرحله در اثر تبدیل ممنتوم فشرده می‌شود. از دیدگاه ائرودینامیکی این پروسه بسیار پیچیده و ناپایدار و از بابت کنترل بسیار حساس می‌باشد. در این جا بدون توجه به دینامیک، ائرودینامیک و کنترل، صرفاً به بررسی ساده ترمودینامیکی پرداخته می‌شود. در شکل (۱-۴) فرایند ۱ به ۲ نمایان‌گر کمپرسور است [4].

- **محفظه احتراق:** فرآیند احتراق و افزودن انرژی به هوای فشرده خروجی از کمپرسور در محفظه احتراق انجام می‌شود (دلیل افزودن انرژی به هوای فشرده پیش از این بیان شد). طراحی کارآمد سیستم احتراق به شدت از سرعت هوای خروجی از کمپرسور تأثیر می‌پذیرد و از این نظر طراحی آخرین استاتور کمپرسور و نیز نازل‌های ورودی به محفظه احتراق بسیار مهم است. به طور کلی می‌توان گفت که سرعت هوا در محدوده ۹۰ متر بر ثانیه سرعت مناسبی در ورودی محفظه احتراق است. جدا از تأثیرات مستقیم کمپرسور بر محفظه احتراق، خود فرایند احتراق نیز بسیار پیچیده و حساس است. ناپایداری هایی که به نام هامینگ[9] در محفظه احتراق شناخته می‌شوند از این دسته هستند. در این بخش بدون توجه به جنبه‌های پیچیده احتراق از دیدگاه دینامیک گاز، سینتیک و

[9] Humming