دانشگاه سیستان و بلوچستان

تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در (مکانیک-تبدیل انرژی)

عنوان:

مطالعه‌ی عددی تاثیر تعداد و زوایای پره در یک کمپرسور توربوشارژر بر عملکرد کمپرسور

استاد راهنما:

دکتر محمد حسین شفیعی میم

تحقیق و نگارش:

محمد آدینه بیگی

(این پایان نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره مند شده است)

بهمن ۹۱

دانشگاه سیستان و بلوچستان

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب ..... تعهد می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجـاع گردیـده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو:

امضاء

تقدیم به:

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا در سایه‌ی حمایت‌های بی دریغشان من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم.

سپاسگزاری

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد. حال که این پژوهش به پایان رسیده، می خواهم از استاد گرانقدر خود دکتر محمد حسین شفیعی که در تمام مراحل پژوهش، مشوق و حامی من بوده تشکر و قدردانی کنم. همچنین از تمام دوستان و همکلاسی‌های خود که مرا در به ثمر رساندن این پژوهش یاری کردند سپاسگذارم.

چکیده

در این پایان نامه به بررسی عددی اثر تغییر تعداد و زوایای پره‌های پروانه‌ی کمپرسور توربوشارژر بر عملکرد کمپرسور پرداخته شده است. این پژوهش به روش عددی انجام شده و برای حل معادلات جریان سیال از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. به دلیل اینکه اطلاعات هندسی کمی درباره‌ی کمپرسور موجود است، برای دستیابی به این اطلاعات، اسکن سه بعدی هندسه‌ی پروانه و حلزونی کمپرسور توربوشارژر گرت T25 صورت گرفته است. هندسه پس از آماده سازی، در نرم افزار انسیس مدل شده است. معادلات سه بعدی ناویر استوکس و معادله‌ی انرژی برای این هندسه حل شده اند. از هوا با خواص گاز کامل به عنوان سیال عامل استفاده شده و جریان پایدار می‌باشد. اثر تغییرات پارامترهای مذکور بر عملکرد کمپرسور در قالب منحنی‌های نسبت فشار کل و بازده‌ی آیزنتروپیک بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که پروانه‌ی کمپرسور مورد نظر با تعداد پره‌های پیش فرض (۶ پره) در محدوده‌ی وسیعی از دبی جرمی دارای بهترین عملکرد می‌باشد. همچنین با افزایش و کاهش زاویه‌ی ورودی پره در لایه‌ی ریشه تغییر کمی در نسبت فشار کل کمپرسور مشاهده شد. اما، افزایش این زاویه در لایه‌ی شرود به دلیل تاثیر بیشتر بر سرعت‌ها باعث افزایش انرژی انتقال داده شده به سیال می‌شود. با افزایش ۹ درجه‌ای این زاویه در دبی جرمی ۰/۱۲۲ kg/s، بازده‌ی آیزنتروپیک و نسبت فشار کل به ترتیب ۱/۶۷ و ۱/۷ درصد نسبت به کمپرسور اولیه افزایش می یابند. تغییر زاویه‌ی پره در خروجی بیشترین تاثیر را در منحنی‌های عملکرد کمپرسور می‌گذارد. دلیل این امر نقش تعیین کننده‌ی این زاویه در جهت جریان خروجی است. با کاهش ۹ درجه‌ای این زاویه در دبی جرمی ۰/۱۲۴ kg/s بازده‌ی آیزنتروپیک و نسبت فشار کل به ترتیب ۱/۱۲ و ۳/۴۳ درصد نسبت به کمپرسور اولیه افزایش می یابند. در نهایت با استفاده از زوایایی که در آن‌ها حداکثر بازده و نسبت فشار به ازای کمترین دبی جرمی حاصل می‌شود، پروانه‌ای جدید طراحی شده است. نتایج حاصل از تحلیل کمپرسور نهایی نشان دهنده‌ی تغییر محدوده‌ی دبی جرمی کارکرد در مقایسه با کمپرسور اولیه می‌باشد. در دبی جرمی یکسان با کمپرسور اولیه، مقادیر متوسط بازده‌ی آیزنتروپیک و نسبت فشار کل کمپرسور نهایی به ترتیب ۶/۵۲ و ۶/۶۵ درصد و قدرت مصرفی کمپرسور ۶/۱۹ درصد افزایش می یابند.

کلمات کلیدی: کمپرسور گریز از مرکز - پروانه - بررسی عددی - زاویه‌ی پره‌ها - مدل‌سازی جریان

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- اجزای کمپرسور گریز از مرکز ۴
۱-۳- انگیزه و هدف ۶
۱-۴- تعریف مسئله و روش حل ۶
۱-۵- ساختار پایان‌نامه ۹

فصل دوم: مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۱۰

۲-۱- مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۱۱

فصل سوم: ویژگی‌های کمپرسور گریز از مرکز و معادلات حاکم ۱۷

۳-۱-مقدمه ۱۸
۳-۲- معادلات بقای حاکم در دستگاه مختصات ساکن ۱۹
۳-۳- شرایط مرزی حاکم بر مسئله در دستگاه مختصات ساکن ۲۴
۳-۴- معادلات بقای حاکم در دستگاه مختصات دورانی ۲۵
۳-۵- شرایط مرزی حاکم بر مسئله در دستگاه مختصات دورانی ۲۷
۳-۶- مدل‌سازی جریان نزدیک دیوار ۲۸
۳-۷- تعریف کمیت‌ها و معادلات حاکم بر جریان سیال ۳۰
۳-۷-۱- فشار مرجع ۳۰
۳-۷-۲- فشار استاتیک ۳۱
۳-۷-۳- آنتالپی استاتیک ۳۱
۳-۷-۴- آنتالپی کل ۳۲
۳-۷-۵- دمای استاتیک ۳۲
۳-۷-۶- دمای کل ۳۳
۳-۷-۷- آنتروپی ۳۳
۳-۷-۸- فشار کل ۳۴
۳-۷-۹- فشار اصلاح شده ۳۵
۳-۷-۱۰- بازده‌ی آیزنتروپیک ۳۵

۳-۶-۱۱- نسبت فشار کل ۳۷

فصل چهارم: مدل سازی هندسه، شبکه‌بندی و حل عددی ۴۰

۴-۱- مقدمه ۴۱
۴-۲- اصطلاحات رایج در تعریف ویژگی‌های هندسی پروانه‌ی گریز از مرکز..... ۴۱
۴-۳- مثلث‌های سرعت..... ۴۵
۴-۴- ضریب لغزش..... ۴۶
۴-۵- اصطلاحات رایج در تعریف ویژگی‌های هندسی حلزونی کمپرسور..... ۴۷
۴-۵-۱- نسبت مساحت به شعاع ۴۷
۴-۶- رسم هندسه‌ی پروانه..... ۴۸
۴-۷- رسم حلزونی ۴۹
۴-۸- نرم‌افزار تولید شبکه‌ی پروانه ۵۱
۴-۹- مراحل تولید شبکه برای پروانه ۵۲
۴-۹-۱- تعیین اندازه‌ی لقی در شرود ۵۲
۴-۹-۲- ساخت توپولوژی سطح..... ۵۲
۴-۹-۳- مشخص کردن ویژگی‌های شبکه ۵۶
۴-۱۰- نرم‌افزار تولید شبکه‌ی حلزونی..... ۵۸
۴-۱۱- رابط ۵۹
۴-۱۲- تئوری گسسته سازی معادلات حاکم ۶۵
۴-۱۳- استراتژی حل- حل کننده‌ی کوپل شده..... ۶۵
۴-۱۳-۱- سیستم معادلات کوپل شده..... ۶۷
۴-۱۳-۲- حل معادلات خطی..... ۶۹
۴-۱۳-۳- روش چند شبکه‌ای جبری ۷۰
۴-۱۴- آماده سازی حل کننده ۷۱
۴-۱۴-۱- تعیین خواص سیال ۷۱
۴-۱۴-۲- مدل انتقال حرارت ۷۲
۴-۱۴-۳- شرایط مرزی ۷۳
۴-۱۴-۴- کنترل همگرایی..... ۷۵

فصل پنجم: ارائه و بررسی نتایج ۷۸

۵-۱- روش‌های تحلیل عملکرد کمپرسور ۷۹
۵-۲- چیدمان دستگاه و شرایط مرزی..... ۷۹
۵-۳- بررسی استقلال از شبکه..... ۸۰
۵-۴- بررسی دقت نتایج عددی..... ۸۴
۵-۵- اعمال تغییرات هندسی و بررسی نتایج ۸۶
۵-۶- طرح نهایی ۱۰۷

فصل ششم: نتیجه گیری ۱۱۲

۶-۱- نتیجه گیری ۱۱۳
۶-۲- پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار ۱۱۴
مراجع ۱۱۶
پیوست ها ۱۱۸
پیوست (الف)- استخراج معادلات بقای k و ω مدل توربولانسی k-ω SST و جزئیات مدل سازی جریان نزدیک دیوار ۱۱۹
الف-۱- مدل k-ω در Ansys CFX ۱۱۹
الف-۲- مدل k-ω SST ۱۱۹
الف-۳- رفتار نزدیک دیوار خودکار برای مدل‌های ω-based ۱۲۲
پیوست (ب)- مراحل استخراج هندسه‌های پروانه و حلزونی کمپرسور با استفاده از نرم‌افزار Ansys BladeGen ۱۲۴
ب-۱- نرم‌افزار طراحی اجزای ماشین دوار ۱۲۴
ب-۲- مراحل رسم حلزونی کمپرسور ۱۳۴
پیوست (ج)- مراحل شبکه بندی هندسه‌های پروانه و حلزونی در نرم افزارهای Ansys TurboGrid و Ansys CFX Meshing ۱۳۷
ج-۱- مراحل شبکه بندی پروانه با استفاده از نرم افزار Ansys TurboGrid ۱۳۷
ج-۲- مراحل شبکه بندی حلزونی با استفاده از نرم افزار Ansys CFX Meshing ۱۴۰
پیوست (د)- مراحل حل عددی در نرم افزار CFX ۱۴۲
د-۱- وارد کردن شبکه بندی‌های پروانه و حلزونی به نرم افزار CFX ۱۴۲
د-۲- تعیین میدان‌های حل، شرایط مرزی و ویژگی‌های حل کننده ۱۴۲
د-۳- راه اندازی حل کننده با شرایط مرزی تعیین شده در محیط Ansys CFX Solver Manager ۱۴۷
د-۴- مشاهده‌ی نتایج در محیط CFD-Post ۱۴۹

فهرست جدول‌ها

عنوان جدول **صفحه**

جدول ۴-۱. خواص هوا به عنوان گاز ایده آل ۷۲

جدول ۵-۱. شرایط مرزی ورودی و خروجی کمپرسور ۸۰

جدول ۵-۲. شبکه‌بندی‌های هندسه‌ی پروانه ۸۱

جدول ۵-۳. شبکه‌بندی‌های هندسه‌ی حلزونی ۸۱

جدول ۵-۴. نتایج حل با شرایط مرزی مرحله‌ی چهارم ۸۱

جدول ۵-۵. عدد رینولدز در مرز خروجی بر حسب قطر خروجی حلزونی ۸۳

جدول ۵-۶. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از تغییر تعداد پره‌ها در حداکثر نسبت فشار ۸۹

جدول ۵-۷. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از تغییر زاویه‌ی ورودی در ریشه در حداکثر نسبت فشار ۹۲

جدول ۵-۸. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از تغییر زاویه‌ی ورودی شرود در حداکثر نسبت فشار ۹۴

جدول ۵-۹. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از تغییر زاویه‌ی خروجی در حداکثر نسبت فشار ۹۷

فهرست شکل ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۱-۱. مراحل فرآیند توربوشارژینگ همراه با خنک کننده میانی[۱] ۳

شکل ۱-۲. انواع پروانه‌ی کمپرسور گریز از مرکز[۵] ۵

شکل ۱-۳. اجزای کمپرسور توربوشارژر Garrett T25 ..... ۷

شکل ۱-۴. محل قرار گیری میدان‌های حل پروانه و حلزونی و مرزهای ورودی و خروجی ۸

شکل ۲-۱. پروفیل روتور مورد استفاده در روش حل عددی شبه سه بعدی کاتسانیس[۸] ۱۱

شکل ۲-۲. کمپرسورهای مورد مطالعه‌ی پیتکانن و همکاران، طرح اولیه (بالا) و طرح نهایی (پایین)[۹] ۱۲

..... ۲۶

شکل ۳-۱. محل قرارگیری دستگاه مختصات نسبی متحرک (x-y) با سرعت زاویه‌ای Ω و دستگاه مختصات مرجع ساکن (X-Y) در مسئله‌ی حاضر ۲۶

شکل ۳-۲. تقسیم بندی مناطق نزدیک دیوار در یک جریان توربولانس[۱۶] ۲۹

شکل ۳-۳. نمودار H-S فرایند انبساط(راست) و تراکم(چپ)[۱۹] ۳۶

شکل ۴-۱. زاویه‌ی تتای صفر درجه در خروجی(راست) و زاویه‌ی تتای ۵۰ درجه در خروجی (چپ) ۴۱

شکل ۴-۲. پره با زاویه‌ی بتای ۶۰ درجه‌ی ورودی در لایه‌ی شرود ۴۱

شکل ۴-۳. مشخصات هندسی در نمای پره به پره ۴۳

شکل ۴-۴. مشخصات هندسی در نمای نصف‌النهاری ۴۳

شکل ۴-۵. نحوه‌ی تعیین قطر ورودی و خروجی پروانه‌ها برای محاسبه‌ی ثابت شکل [۱] ۴۴

شکل ۴-۶. زوایای سرعت‌های مطلق و نسبی ورودی پره در لایه‌ی شرود ۴۵

شکل ۴-۷. زوایای سرعت‌های مطلق و نسبی خروجی پره در لایه‌ی شرود ۴۶

شکل ۴-۸. مساحت و شعاع مورد استفاده برای محاسبه‌ی نسبت مساحت به شعاع ۴۷

شکل ۴-۹. پروانه‌ی کمپرسور TB28 رسم شده توسط نرم‌افزار Ansys BladeGen ۴۹

شکل ۴-۱۰. مراحل اسکن پروانه‌ی کمپرسور و حلزونی آن توسط دستگاه اندازه برداری L3D ۴۹

شکل ۴-۱۱. هندسه‌ی اجزا به صورت مونتاژ شده(راست)، پروانه‌ها و سطح داخلی حلزونی‌های کمپرسور و توربین(چپ) ۵۰
شکل ۴-۱۲. مسیر جریان در حلزونی کمپرسور مدل شده..... ۵۰
شکل ۴-۱۳. توپولوژی شبکه در لایه‌های ریشه و شرود ۵۳
شکل ۴-۱۴. تراکم شبکه‌ی نزدیک سطح پره با فاکتور عرض ۰/۳(راست) و ۰/۱(چپ) ۵۳
شکل ۴-۱۵. یک المان شش وجهی و اجزای آن ۵۴
شکل ۴-۱۶. اصلاح زوایای بلوک‌های توپولوژی با استفاده از تغییر محل نقاط کنترلی ۵۵
شکل ۴-۱۷. اصلاح زوایای بلوک‌های توپولوژی با استفاده از افزایش موضعی تراکم شبکه ۵۵
شکل ۴-۱۸. ضریب فاکتور سطح ۰/۰۴ برای ضخامت اولین لایه‌ی المان نزدیک سطح پره ۵۷
شکل ۴-۱۹. قسمتی از شبکه‌ی تولید شده با فاکتور تعداد المان ۲۰(راست) و ۱۰(چپ)..... ۵۷
شکل ۴-۲۰. شبکه‌ی تولید شده با فاکتور اندازه‌ی بدنه‌ی ۰/۳ ..... ۵۸
شکل ۴-۲۱. شبکه‌ی تولید شده با فاکتور اندازه‌ی بدنه‌ی ۰/۲۵ ..... ۵۹
شکل ۴-۲۲. رابط‌های تکرار شونده [۱۹] ۶۰
شکل ۴-۲۳. استفاده از مدل رابط کلی برای اتصال شبکه‌هایی با المان‌های متفاوت[۱۹]..... ۶۱
شکل ۴-۲۴. استفاده از مدل رابط کلی برای اتصال میادین حلی با دستگاه مختصات و گام متفاوت[۱۹].... ۶۱
شکل ۴-۲۵. تقارن محوری رابط حول محور دوران پروانه(z) ۶۳
شکل ۴-۲۶. المان هایی با نسبت منظری کمتر از ۱۰ و بیشتر از ۰/۱ در سطح رابط[۱۹] ۶۳
شکل ۴-۲۷. مناطق پیشنهادی برای قرار دادن رابط بین میادین حل دورانی و ثابت[۱۹]..... ۶۴
شکل ۴-۲۸. محل نامناسب رابط در انتهای پره‌های ضخیم [۱۹] ۶۴
شکل ۴-۲۹. فرآیند کلی حل میدان جریان در الگوریتم [۱۹] ۶۷
شکل ۴-۳۰. مراحل تغییر شبکه در روش چند شبکه ای [۱۹]..... ۷۱
شکل ۵-۱. منحنی بازده‌ی آیزنتروپیک بر حسب دبی جرمی برای شبکه‌بندی‌ها با تعداد المان‌های مختلف . ۸۲
شکل ۵-۲. منحنی نسبت فشار کل بر حسب دبی جرمی برای شبکه‌بندی‌ها با تعداد المان‌های مختلف..... ۸۳
شکل ۵-۳. منحنی عملکرد کمپرسور Garrett T25 رسم شده توسط شرکت Aligned Automotive [۲۲] ۸۴
شکل ۵-۴. اعتبارسنجی نتایج بدست آمده برای نسبت فشار کل با داده‌های آزمایشگاهی موجود ۸۵
شکل ۵-۵. اعتبارسنجی نتایج بدست آمده برای نسبت فشار کل با داده‌های آزمایشگاهی موجود ۸۶
شکل ۵-۶. پروانه‌ای با ۶ پره‌ی اصلی و ۶ پره‌ی جداکننده (راست) و پروانه‌ای با ۴ پره‌ی اصلی و ۴ پره‌ی جدا کننده (چپ) ۸۷

شکل ۵-۷. تاثیر تغییر تعداد پره‌ها در بازده آیزنتروپیک در دبی جرمی‌های مختلف ۸۷
شکل ۵-۸. تاثیر تغییر تعداد پره‌ها در نسبت فشار در دبی جرمی‌های مختلف ۸۸
شکل ۵-۹. تاثیر تغییر زاویه ریشه در ورودی پره‌ها بر بازده آیزنتروپیک..... ۹۰
شکل ۵-۱۰. تاثیر تغییر زاویه ریشه در ورودی پره‌ها بر نسبت فشار ۹۱
شکل ۵-۱۱. تاثیر تغییر زاویه‌ی ورودی پره‌ها در شرود بر بازده‌ی آیزنتروپیک ۹۳
شکل ۵-۱۲. تاثیر تغییر زاویه ورودی پره‌ها در شرود بر نسبت فشار ۹۳
شکل ۵-۱۳. کانتورهای سرعت‌های نسبی در نمای پره به پره در فاصله‌ی عرضی ۲۰ درصد (بالا) و فاصله‌ی عرضی ۸۰ درصد (پایین) ۹۵
شکل ۵-۱۴. تاثیر کاهش زاویه خروجی پره‌ها در بازده آیزنتروپیک ۹۶
شکل ۵-۱۵. تاثیر کاهش زاویه خروجی پره‌ها در نسبت فشار..... ۹۷
شکل ۵-۱۶. خطوط هم تراز فشار در مرز خروجی کمپرسور a) چهار پره‌ی اصلی و b) هفت پره‌ی اصلی ... ۹۸
شکل ۵-۱۷. خطوط هم تراز فشار در مرز خروجی کمپرسور با زاویه‌ی ورودی ریشه a) ۱۸/۱۶ درجه و b) ۳۶/۱۶ درجه..... ۹۹
شکل ۵-۱۸. خطوط هم تراز فشار در مرز خروجی کمپرسور با زاویه‌ی ورودی شرود a) ۵۲/۲۲ درجه و b) ۷۰/۲۲ درجه ۹۹
شکل ۵-۱۹. خطوط هم تراز فشار در مرز خروجی کمپرسور با زاویه‌ی خروجی a) ۲۶/۱۸ درجه و b) ۴۴/۱۸ درجه..... ۱۰۰
شکل ۵-۲۰. خطوط هم تراز فشار حلزونی در صفحه‌ای با مختصات z=12.2 mm در کمپرسور با a) چهار پره‌ی اصلی و b) هفت پره‌ی اصلی ۱۰۱
شکل ۵-۲۱. خطوط هم تراز فشار حلزونی در صفحه‌ای با مختصات z=12.2 mm در کمپرسور با زاویه‌ی ورودی ریشه a) ۱۸/۱۶ درجه و b) ۳۶/۱۶ ..... ۱۰۱
شکل ۵-۲۲. خطوط هم تراز فشار حلزونی در صفحه‌ای با مختصات z=12.2 mm در کمپرسور با زاویه‌ی ورودی شرود a) ۵۲/۲۲ درجه و b) ۷۰/۲۲ درجه ۱۰۲
شکل ۵-۲۳. خطوط هم تراز فشار حلزونی در صفحه‌ای با مختصات z=12.2 mm در کمپرسور با زاویه‌ی خروجی a) ۲۶/۱۸ درجه و b) ۴۴/۱۸ درجه ۱۰۲
شکل ۵-۲۴. خطوط هم تراز فشار در نمای نصف‌النهاری پروانه‌ای با چهار پره‌ی اصلی ۱۰۳
شکل ۵-۲۵. خطوط هم تراز فشار در نمای نصف‌النهاری پروانه‌ای با هفت پره‌ی اصلی..... ۱۰۳
شکل ۵-۲۶. خطوط هم تراز فشار در نمای نصف‌النهاری پروانه‌ای با زاویه‌ی ورودی ریشه‌ی ۱۸/۱۶ درجه. ۱۰۴
شکل ۵-۲۷. خطوط هم تراز فشار در نمای نصف‌النهاری پروانه‌ای با زاویه‌ی ورودی ریشه‌ی ۳۶/۱۶ درجه. ۱۰۴
شکل ۵-۲۸. خطوط هم تراز فشار در نمای نصف‌النهاری پروانه‌ای با زاویه‌ی ورودی شرود ۵۲/۲۲ درجه... ۱۰۵

شکل ۵-۲۹. خطوط هم تراز فشار در نمای نصف‌النهاری پروانه‌ای با زاویه‌ی ورودی شرود ۷۰/۲۲ درجه... ۱۰۵
شکل ۵-۳۰. خطوط هم تراز فشار در نمای نصف‌النهاری پروانه‌ای با زاویه‌ی خروجی ۲۶/۱۸ درجه.....۱۰۶
شکل ۵-۳۱. خطوط هم تراز فشار در نمای نصف‌النهاری پروانه‌ای با زاویه‌ی خروجی ۴۴/۱۸ درجه.....۱۰۶
شکل ۵-۳۲. تغییر بازده‌ی آیزنتروپیک کمپرسور نهایی نسبت به کمپرسور اولیه ۱۰۷
شکل ۵-۳۳. تغییر نسبت فشار کل کمپرسور نهایی نسبت به کمپرسور اولیه..... ۱۰۸
شکل ۵-۳۴. تغییر قدرت مصرفی کمپرسور نهایی نسبت به کمپرسور اولیه..... ۱۰۸
شکل ۵-۳۵. خطوط جریان عبوری از پروانه‌ی کمپرسور اولیه ۱۱۰
شکل ۵-۳۶. کانتور سرعت‌های نسبی در خروجی پروانه‌ی کمپرسور اولیه (بالا) و کمپرسور نهایی (پایین) ۱۱۱
شکل الف-۱. استفاده از روش نزدیک دیوار خودکار در مدل توربولانسی k-ω SST..... ۱۲۳
شکل ب-۱. نمای کلی از محیط نرم‌افزار Ansys BladeGen..... ۱۲۵
شکل ب-۲. تعیین داده‌های هندسی مورد نیاز برای تولید نمای نصف‌النهاری پره(راست) و تعیین ضخامت و زاویه‌ی چرخش ورودی نسبت به خروجی(چپ)..... ۱۲۵
شکل ب-۳. مراحل وارد کردن هندسه‌ی پروانه به محیط Import Wizard ۱۲۷
شکل ب-۴. انتخاب نوع فایل نهایی ۱۲۷
شکل ب-۵. تعیین مسیر نگهداری فایل پشتیبانی (Back Up)..... ۱۲۸
شکل ب-۶. انتخاب فایل داده‌های ورودی به محیط Import Wizard..... ۱۲۸
شکل ب-۷. انتخاب منحنی ریشه برای استفاده در نمای نصف النهاری..... ۱۲۹
شکل ب-۸. انتخاب منحنی شرود برای استفاده در نمای نصف النهاری..... ۱۲۹
شکل ب-۹. تعیین منحنی‌های لایه‌های مختلف پره برای پره‌های اصلی و جداکننده..... ۱۳۰
شکل ب-۱۰. تنظیم پروفیل نصف النهاری با استفاده از تغییر نقاط منحنی‌های ریشه و شرود..... ۱۳۰
شکل ب-۱۱. نمایش همزمان لایه‌های پره و منحنی نصف النهاری..... ۱۳۱
شکل ب-۱۲. تعیین نسبت منظری نوک و انتهای پره..... ۱۳۱
شکل ب-۱۳. تنظیم نقاط مماسی در نمای پره به پره..... ۱۳۲
شکل ب-۱۴. تعیین تعداد پره‌ها، زاویه‌ی پیچش تتا، ضخامت میانگین و نسبت سطوح ورودی به خروجی و محل ذخیره‌ی فایل نهایی ۱۳۲
شکل ب-۱۵. تعریف منحنی زاویه‌ی به شکل منحنی اسپیلان..... ۱۳۳
شکل ب-۱۶. پروانه‌ای با زاویه‌ی بتای خروجی در لایه‌ی ریشه ی۳۰- درجه ۱۳۳
شکل ب-۱۷. پروانه‌ای با زاویه‌ی بتای خروجی در لایه‌ی ریشه ی۱۰- درجه ۱۳۴
شکل ب-۱۸ . وارد کردن هندسه‌ی حلزونی به محیط نرم افزار Ansys DesignModeler..... ۱۳۵

شکل ب-۱۹ . چسباندن صفحه‌ها به یکدیگر به منظور ساده سازی هندسه ۱۳۵
شکل ب-۲۰. اصلاح صفحات و زاویه‌ها با استفاده از دستور Repair ۱۳۶
شکل ج-۱. نحوه‌ی انتقال هندسه‌ی پروانه به نرم افزار Ansys TurboGrid محیط Workbench ۱۳۷
شکل ج-۲. تعیین لقی نوک پره ۱۳۸
شکل ج-۳. تعیین ویژگی‌های توپولوژی سطح ۱۳۸
شکل ج-۴. رفع خطاهای لایه‌های مختلف ۱۳۸
شکل ج-۵. تعیین ویژگی‌های کلی شبکه..... ۱۳۸
شکل ج-۶. تعیین تعداد المان‌ها در راستای Span ۱۳۹
شکل ج-۷. تعیین اندازه‌ی اولین المان نزدیک دیواره و تعداد المان‌های بین پره و حلقه‌ی دور پره..... ۱۳۹
شکل ج-۸. نوع شبکه بندی در فاصله‌ی بین نوک پره و شرود در پنجره‌ی Shroud Tip ۱۳۹
شکل ج-۹. تعیین اندازه‌ی اولین المان نزدیک دیواره و تعداد المان‌های بین پره و حلقه‌ی دور پره..... ۱۳۹
شکل ج-۱۰. تولید مش ۱۳۹
شکل ج-۱۱. وارد کردن هندسه‌ی حلزونی به محیط شبکه بندی ۱۴۰
شکل د-۱. وارد کردن هندسه‌ی شبکه بندی حلزونی به محیط Setup ۱۴۴
شکل د-۲. وارد کردن شبکه‌ی پروانه به محیط Setup ۱۴۴
شکل د-۳. ایجاد یک میدان حل..... ۱۴۴
شکل د-۴. ویژگی‌های میدان حل پروانه..... ۱۴۵
شکل د-۵. ویژگی‌های میدان حل حلزونی ۱۴۵
شکل د-۶. انتخاب مدل انتقال حرارت و مدل توربولانسی برای میدان‌های حل ۱۴۵
شکل د-۷. انواع مرزهای مورد استفاده در حل مسئله ۱۴۵
شکل د-۸. تعیین محل مرز ۱۴۶
شکل د-۹. تعیین شرایط مرزی در مرز انتخاب شده..... ۱۴۶
شکل د-۱۰. تعیین ویژگی‌های رابط ۱۴۶
شکل د-۱۱. تعیین پارامترهای حل کننده ۱۴۶
شکل د-۱۲. وارد کردن اطلاعات حل به محیط حل کننده..... ۱۴۷
شکل د-۱۳. راه اندازی محیط Ansys CFX Solver Manager و مشاهده‌ی همگرایی باقیمانده ها ۱۴۸
شکل د-۱۴. محیط Ansys CFX Solver Manager..... ۱۴۸
شکل د-۱۵. مشاهده‌ی تغییر سایر متغییرها در سربرگ Monitors از دستور Workspace Properties ۱۴۹

شکل د-۱۶. نحوه‌ی بارگزاری نتایج حل در محیط CFD-Post ۱۵۰
شکل د-۱۷. مشاهده‌ی نتایج حاصل در نمای Table Viewer..... ۱۵۱
شکل د-۱۸. تعیین مقدار یک متغییر در مکانی خاص ۱۵۱
شکل د-۱۹. نحوه‌ی ذخیره کردن نتایج در فایلی با پسوند cgns..... ۱۵۲

فهرست علائم

علامت	نشانه
$a(m/s)$	سرعت صوت در محیط
$a^*(m/s)$	شتاب نسبت به دستگاه مختصات مرجع ثابت
$a_0(m/s)$	شتاب خطی دستگاه مختصات نسبی
$C(m/s)$	سرعت مطلق سیال
$C_r(m/s)$	سرعت شعاعی سیال در مسیر پروانه
$C_x(m/s)$	سرعت مماسی سیال در مسیر پروانه
$c_p(J/kgK)$	گرمای ویژه سیال
$h_{stat}(J/kg)$	آنتالپی استاتیک
$h_{tot}(J/kg)$	آنتالپی کل
$I(J/kg)$	روتالپی
$k(m^2/s^2)$	انرژی جنبشی توربولانس بر واحد جرم
$\dot{m}(kg/s)$	دبی جرمی
$N(rpm)$	سرعت دورانی
$P_k(kg/ms^3)$	نرخ تولید توربولانس
$p_{abs}(Pa)$	فشار مطلق
$p_{ref}(Pa)$	فشار مرجع

$p_{stat}(Pa)$	فشار استاتیک
$p_{tot}(Pa)$	فشار کل
Pr	عدد پرانتل
Pr_t	عدد پرانتل توربولانس
$r(m)$	شعاع پروانه در هر نقطه
Re	عدد رینولدز
$s(J/kgK)$	آنتروپی
$s_{ref}(J/kgK)$	آنتروپی مرجع
S	نرخ کرنش
$S_E(kg/ms^3)$	جمله‌ی چشمه‌ی انرژی
$S_{cfg}(kg/m^2s^2)$	جمله‌ی چشمه‌ی ممنتوم حاصل از نیروهای گریز از مرکز
$S_{cor}(kg/m^2s^2)$	جمله‌ی چشمه‌ی ممنتوم حاصل از نیروهای کریولیس
$S_M(kg/m^2s^2)$	جمله‌ی چشمه‌ی ممنتوم
$S_{M,rot}(kg/m^2s^2)$	جمله‌ی چشمه‌ی ممنتوم حاصل از دوران
S_Φ	جمله‌ی چشمه‌ی متغیر اسکالر
$T(K)$	دما
$t(s)$	زمان
$U(m/s)$	سرعت در دستگاه مختصات ساکن
$V(m/s)$	سرعت در دستگاه مختصات نسبی
$u_{stat}(J/kg)$	انرژی داخلی استاتیک

$w(m/s)$	سرعت نسبی سیال نسبت به سرعت خطی پروانه
$W(w)$	کار انجام شده بر روی سیال
Z	تعداد پره‌های پروانه

علائم یونانی	**نشانه**
$\alpha(degree)$	زاویه‌ی سرعت مطلق سیال نسبت به جهت مماسی
$\beta(degree)$	زاویه‌ی پره در هر نقطه نسبت به جهت مماسی
ϕ	متغیر اسکالر دلخواه
γ	نسبت گرماهای ویژه
$\Gamma(kgm/s)$	ضریب دیفیوژن
$\Gamma_t(kgm/s)$	ضریب دیفیوژن گردابه ای
$\eta_c(\%)$	بازده آیزنتروپیک کمپرسور
$\lambda(w/mK)$	ضریب هدایت حرارتی
$\lambda_t(w/mK)$	ضریب هدایت حرارتی توربولانس
$\mu(kg/m.s)$	لزجت دینامیکی
$\mu_{eff}(kg/m.s)$	لزجت دینامیکی موثر
$\mu_t(kg/m.s)$	لزجت دینامیکی توربولانس
π	نسبت فشار کل
$\rho(kg/m^3)$	چگالی سیال
$\rho_{stat}(kg/m^3)$	چگالی استاتیک سیال

Ma	عدد ماخ جریان
$M(N.m)$	جمع گشتاور نیروهای خارجی وارد شده به سیستم
σ_s	ضریب لغزش
$\tau(N/m^2)$	تانسور تنش
$\nu(m^2/s)$	لزجت سینماتیکی
$\Omega(rad/s)$	سرعت دورانی
$\omega(1/s)$	فرکانس توربولانس

فصل اول

مقدمه