بسم الله الرحمن الرحيم

٤٤٩٣٣

۱۳۸۱ /۱۲/ ۱۰

دانشگاه تربیت مدرس

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه شده در مرکز

# دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی - گروه مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکانیک - گرایش تبدیل انرژی

## موضوع

# شبیه سازی عددی جریان در محفظه احتراق حلقوی توربین گاز از خروجی کمپرسور تا ورودی توربین

## نگارش

عبدالحسین دارمی زاده

## استاد راهنما

دکتر محمد رضا انصاری

زمستان ۱۳۸۱

٤٤٩٥٥

دانشگاه تربیت مدرس

# تاییدیه هیات داوران

آقای عبدالحسین دارمی زاده پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان شبیه سازی عددی جریان در محفظه احتراق حلقوی توربین گاز از خروجی کمپرسور تا ورودی توربین در تاریخ ۸۱/۱۰/۲ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان‌نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک با گرایش تبدیل انرژی پیشنهاد می‌کنند.

| اعضای هیات داوران | نام و نام خانوادگی | امضاء |
|---|---|---|
| ۱ـ استاد راهنمـــا : | آقای دکتر انصاری | |
| ۲ـ استاد مشـــاور : | ــــــــــ | |
| ۳ـ استادان ممتحن : | آقای دکتر معرفت - دکتر حیدری نژاد | |
| | آقای دکتر کریمیان | |
| ۴ـ مدیـــر گـــروه : | آقای دکتر مسلمی | |
| (یا نمایندهٔ گروه تخصصی) | | |

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان‌نامه/رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما: محمدرضا انصاری

بسمه‌تعالی

# آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

*«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ مهندسی مواد است که در سال ۱۳۸۱ در دانشکدهٔ فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر محمدرضا رضایی، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ــــــ و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ــــــ از آن دفاع شده است.»*

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهداکند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت 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 مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب عبدالحسین داری‌زاده دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی: عبدالحسین داری‌زاده

تاریخ و امضا:

۸۱/۱۰/۲۴

**تقدیم به**

**پدر و مادر عزیزم**

که از هیچ کوششی در راه اعتلای اینجانب دریغ ننموده و همواره مشوقم بوده اند.

**و**

**همسر مهربانم**

که با صبر و تحمل دوران سخت دانشجوئی را تحمل نموده و همواره یار و پشتیبانم بوده است .

## تقدیر و تشکر:

از استاد محترم جناب آقای دکتر انصاری که در انجام این پایان نامـه و دوران تحصیل همواره از یاری و راهنمائیهای ارزنده ایشان بـهره بـرده ام ، تقدیـر و تشکر می نمایم .

همچنین لازم می دانم از همکاری مسئولان محترم دفتر طراحی موتور شرکت صنایع هواپیمائی و آقایان مهندس عمـاد زارعـان و مـهندس مـهدی جـهرمی تشکر نمایم .

# چکیده

هدف از انجام این رساله شبیه سازی عددی جریان در محفظه احتراق حلقوی به صورت توام و از خروجی کمپرسور تا ورودی توربین است . کارهای قبلی انجام شده ، بر اساس شبیه سازی جریان در قسمتهای مختلف محفظه به صورت مجزا بوده است . در این کارها غالبا از شرایط مرزی استخراج شده از روابط تجربی و نیمه تجربی استفاده می شده است . در کار حاضر نیازی به اعمال شرط مرزی در سوراخها نیست و فقط در خروجی کمپرسور و ورودی توربین شرط مرزی اعمال می گردد . بدلیل نبود نتایج تجربی در مورد حل توام جریان در محفظه ، یک جریان مشابه و مهم محفظه احتراق که شامل جریان جتهای روبرو در جریان متقاطع است مورد بررسی قرار گرفت . هندسه مورد نظر جریان داخل محفظه و کانال حلقوی اطراف را در بر می گیرد . در این تحلیل عملکرد مدلهای آشفتگی مختلف بررسی گردید . نتایج حاکی از آن است که مدل RSM توانائی پیش بینی خوب میدان جریان را داراست .

سپس جریان در یک محفظه احتراق حلقوی کاربردی شبیه سازی و نتایج مورد تحلیل قرار گرفت . نتایج تجربی در مورد این محفظه به صورت توزیع ضریب بازیافت فشار استاتیکی در پوسته بیرونی و درونی محفظه موجود است. در ضمن مقدار تقسیم دبی جریان بین سوراخهای ناحیه های مختلف محفظه احتراق که از روشی مرکب از روابط تجربی و تصحیح عددی بدست آمده‌اند در دسترس است . مقایسه نتایج عددی حاضر با نتایج تجربی موجود نشانگر تطابق خوب جوابها می باشد . در نهایت جریان در یک محفظه احتراق حلقوی کاربردی که در مرحله طراحی قرار دارد جهت شناسائی اشکالات موجود شبیه سازی شد. پس از تحلیل نتایج و بررسی اشکالات، پیشنهادهای لازم جهت اصلاح طرح ارائه گردیده است .

**واژه‌های کلیدی:محفظه احتراق حلقوی، شبیه سازی عددی، توربین گاز، میدان جریان**

# فهرست


**۱- مقدمه ..... ۲**

۱-۱-مسئله مورد نظر در تحقیق حاضر ..... ۲

۱-۲-اهمیت شبیه سازی عددی جریان سرد محفظه احتراق توربین گاز ..... ۲

۱-۳-مروری بر تحقیقات انجام شده ..... ۴

۱-۳-۱-جت در جریان متقاطع ..... ۴

۱-۳-۲-آئرودینامیک محفظه احتراق ..... ۶

۱-۳-۳-جریان در دیفیوزر و فضای حلقوی اطراف لاینر ..... ۸

۱-۴-معرفی فصل های رساله حاضر ..... ۹

**۲-آشنائی با محفظه احتراق توربین گاز ..... ۱۱**

۲-۱-مقدمه ..... ۱۱

۲-۲-انواع موتورهای جت : ..... ۱۱

۲-۳-محفظه احتراق موتور های جت ..... ۱۳

۲ -۴-انواع محفظه های احتراق: ..... ۱۴

۲-۴-۱)محفظه های لوله ای : ..... ۱۴

۲-۴-۲)محفظه های حلقوی ..... ۱۴

۲-۴-۳- محفظه احتراق لوله ای حلقوی ..... ۱۶

۲-۵- اجزاء محفظه احتراق : ..... ۱۶

۲-۶- نواحی مختلف محفظه احتراق : ..... ۲۱

۲-۶-۱) ناحیه اولیه در محفظه احتراق:..... ۲۱
۲-۶-۲) ناحیه میانی..... ۲۱
۲-۶-۳) ناحیه رقیق سازی ..... ۲۲
**فصل ۳-بررسی تاثیر متقابل جتهای روبرو در جریان متقاطع ..... ۲۳**
۳-۱-مقدمه ..... ۲۴
۳-۲-محفظه آزمایش شده ..... ۲۴
۳-۳ -تخمین ضریب تخلیه دهانه ورودی جت با استفاده از روابط تجربی..... ۲۷
۳-۴- شبیه سازی عددی جریان ..... ۲۹
۳-۴-۱-معادلات حاکم و الگوریتم عددی ..... ۳۰
۳-۴-۲-هندسه و شرایط مرزی ..... ۳۰
۳-۴-۳)تولید شبکه..... ۳۰
۳-۴-۴)تحلیل و بررسی نتایج ..... ۳۱
۳-۵-جمعبندی:..... ۴۰
**فصل ۴-شبیه سازی عددی جریان در محفظه احتراق حلقوی توربین گاز از خروجی کمپرسور تا ورودی توربین ..... ۴۳**
۴-شبیه سازی عددی جریان در محفظه احتراق حلقوی توربین گاز ..... ۴۳
۴-۱) مقدمه ..... ۴۳
۴-۲-تحلیل جریان در یک محفظه احتراق حلقوی کاربردی..... ۴۵
۴-۲-۱-معادلات حاکم و الگوریتم عددی ..... ۴۵
۴-۲-۲-شکل هندسی و شرایط مرزی ..... ۴۵
۴-۲-۳-شبکه بندی ..... ۴۶
۴-۲-۴-تحلیل نتایج..... ۴۶

۴-۳-شبیه سازی عددی جریان جهت بررسی عملکرد آئرودینامیکی یک محفظه احتراق ..... ۵۹
۴-۳-۱- شکل هندسی محفظه احتراق و شرایط مرزی ..... ۵۹
۴-۳-۲-تولید شبکه ..... ۶۱
۴-۳-۳-تحلیل و بررسی نتایج ..... ۶۱
۴-۳-۴-جمعبندی ..... ۶۵
۴-۳-۵-پیشنهادات اصلاحی ..... ۶۶
**۵-نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۷۴**
۵-۱- نتیجه گیری ..... ۷۵
۵-۲-پیشنهادات برای ادامه کار ..... ۷۶
**مراجع: ..... ۷۹**

## فهرست علائم و اختصارات

| | |
|---|---|
| اختلاف فشار کل بین خروجی کمپرسور و ورودی توربین | $\Delta P_{3-4}$ |
| افت فشار کل سرد | $\Delta P_{COLD}$ |
| افت فشار گرم | $\Delta P_{HOT}$ |
| چگالی هوای ورودی | $\rho$ |
| سرعت ورودی | U |
| دمای هوای خروجی محفظه | $T_4$ |
| دمای هوای ورودی لاینر | $T_3$ |
| عدد سویرل | $S_N$ |
| شار محوری ممنتم زاویه ای | $G_m$ |
| شار محوری ممنتم محوری | $G_t$ |
| قطر خارجی سویلر | $D_{SW}$ |
| قطر داخلی سویلر | $D_{hub}$ |
| سرعت محوری | W |
| فشار استاتیکی | p |
| سرعت ورودی دیفیوزر | $U_{in}$ |
| زاویه پره سویلر | $\theta$ |
| دبی واقعی جت عبوری از سوراخ | $\dot{m}_h$ |
| دبی ایده ال جت عبوری از سوراخ | $\dot{m}_i$ |
| زاویه متوسط خروجی جت در دهانه سوراخ | $\theta_j$ |
| فشار استاتیکی جریان در کانال سوراخ | $p_a$ |
| فشار استاتیکی جریان در محفظه | $p_c$ |
| فشار کل جریان در کانال حلقوی | $P_a$ |
| ضریب انقباض جت | $C_c$ |
| ضریب تاثیرات سه بعدی بودن جریان | $C_f$ |
| ضریب تصحیح انقباض جت | $C_{fc}$ |
| سطح معادل سوراخ | $A_e$ |
| زاویه سطح | $\theta_h$ |
| زاویه خروجی | $\theta_e$ |

| | |
|---|---|
| ضریب تخلیه سوراخ | $C_d$ |
| دبی فضای حلقوی | $\dot{m}_{ann}$ |
| سرعت متوسط | $u_i$ |
| سرعت آشفتگی | $u'_i$ |
| تنش آشفتگی | $\rho\overline{u'_i u'_j}$ |
| لزجت آشفتگی | $\mu_t$ |
| انرژی جنبشی آشفتگی | k |
| نرخ استهلاک آشفتگی | $\varepsilon$ |
| ترم تولیدK | $G_k$ |

# ۱- مقدمه

## ۱-۱-مسئله مورد نظر در تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر ، تحلیل عددی در شبیه سازی جریان سرد در محفظه احتراق توربین گاز مورد بررسی قرار گرفته است . هدف از این کار ، حل کامل و توام جریان در محفظه احتراق است . بدین منظور یک محفظه احتراق کاربردی توربین گاز مورد بررسی واقع شده است . برای حصول اطمینان از نتایج بدست آمده ، بدلیل نبود نتایج تجربی در مورد محفظه احتراق کامل حلقوی [ 2 ] ، ابتدا جریان خارج یک محفظه احتراق مشابه که شامل کانال های حلقوی و دیفیوزر است به صورت تقارن محوری دو بعدی تحلیل شده و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه گردید . سپس اقدام به مطالعه و تحلیل عددی جریان در کانال حلقوی و جتهای روبرو در جریان متقاطع که از جریانهای مهم محفظه احتراق است ، شده و این نتایج بهمراه بررسی مدلهای آشفتگی متفاوت با نتایج تجربی مقایسه گشته است.

در مرحله بعد یک محفظه احتراق کاربردی که در صنعت هوائی بکار گرفته می شود به صورت سه بعدی از خروجی کمپرسور تا ورودی توربین و بدون در نظر گرفتن اجزای جانبی(لوله های سوخت رسان و استرات) مدل شد و تحلیل جریان در آن صورت پذیرفت .

در ادامه پروژه محفظه احتراق دیگری که در مرحله طراحی قرار دارد با در نظر گرفتن لوله سوخت رسان و استرات مدل گردید . این تحلیل به منظور بررسی اشکالات آئرودینامیکی این محفظه احتراق که در موشکها و هواپیماهای کوچک کاربرد دارد صورت پذیرفته و پیشنهادهای لازم جهت اصلاح آئرودینامیکی ارائه گردید . در تحلیل انجام شده سویلر به طور کامل و سه بعدی مدل شد . سپس به بررسی فیزیک حاکم برجریان و تاثیر متقابل اجزای مختلف پرداخته شد .

## ۱-۲-اهمیت شبیه سازی عددی جریان سرد محفظه احتراق توربین گاز

امروزه آئرودینامیک نقش مهمی را در عملکرد یک محفظه احتراق ایفا می کند . فرایند آئرودینامیک نقش حیاتی را در طراحی و بازده سیستم های محفظه احتراق دارد . وقتی فیزیک جریان محفظه احتراق دقیق تر

بررسی می شود، معلوم می گردد که مجموعه ای از جریانـــهای اساسـی و مشـابه در همـه سیسـتم هـای احتراق وجود دارد . این جریان ها شامل جریانهای چرخشی ،گرادیانهای فشار نامناسب ، لایـه هـای مـرز ی توسعه یافته ، جریانهای برخوردی ، جت در جریان متقاطع و گردابه ای می باشد . بدین منظـور یـک طـراح برای بدست آوردن مشخصه های خوب جریان و عملکرد خوب و پایداربایستی دانش خوبی نسبت به فـیزیک جریان و عملکرد محفظه احتراق داشته باشد .

مقدار قابل توجهی از آلودگی ها ،عمر کوتاه محفظه احتراق، ناپایداری شعله ، مشخصه های ضعیف جریـان و عمر کوتاه پره های توربین از نتایج عدم دقت در طراحی است . طراحی محفظه احتراق توربین گاز نیازمند تستهای گران و تکرارهای بسیاری است . در گذشته مهندسان احتراق به تجربـهِ و تسـت و فرمولـهای خـام جهت طراحی نهائی اعتماد می نمودند [1 ] . دماهای بالا ، گرادیانهای فشار و جریانهای مختلف سـیالات در محفظه احتراق سبب ایجاد میدان جریان پیچیده شده است به طوری که که امکـان جمـع آوری اطلاعـات جامع در این زمینه نیست . بنابر این دینامیک سیالات محاسباتی بواسـطه توانـائی توضیـح فـیزیک جریـان داخل محفظه به ابزار جالبی برای طراحی توربین گاز تبدیل شده است . در دو دهه اخیر اسـتفاده از روش های عددی در پیش بینی رفتار جریان بسیار متداول شده است . روش های عددی با پیشرفت هـای صـورت گرفته در رایانه ها و مدل های فیزیکی و محاسباتی به عنوان ابزاری توانمند در طراحی خود نمایی می کنند . تحلیل عددی با تشخیص تاثیر پارامترهای مختلف در عملکرد محفظه ، جهت کاهش تعـداد تکـرار مراحـل طراحی می تواند مورد استفاده قرار گیرد . امروزه تولید کنندگان بزرگ توربین گاز با کمک گرفتـن از روش های عددی مراحل سعی و خطا برای تایید نهایی طرح را از هشت سال به سه سال در حال حاضر رسانده اند تا کنون مطالعات بسیاری بر روی تحلیل جریان محفظه احتراق صورت پذیرفته است .

در زمینه کار های عددی کار های اولیه شامل تحلیل های ساده دو بعدی و تقار ن محوری بـوده اسـت . بـا پیشرفت های تکنیک های عددی ،اقدام به تحلیل جریان در اجزای مختلف محفظه احتراق به صـورت سـه بعدی گردید . در کارهای مزبور در سوراخهای تزریق هوا به درون محفظه و نحوه تقسیم جریـان از شـرایط مرزی برگرفته از روش های تجربی و مدلهای یک بعدی استفاده می شد که خالی از خطا نبوده است .

## ۱-۳-مروری بر تحقیقات انجام شده

کارهای گزارش شده در مورد آئرودینامیک محفظه احتراق معمولا بر جریان داخلی و یا خارجی محفظه به صورت مجزا متمرکز است . مدت بسیار اندکی است که چه کارهای تجربی و یا تئوری به تحلیل جریان داخل و خارج محفظه به صورت توام پرداخته است [2] . کارهای صورت پذیرفته در مورد محفظه احتراق شامل :

۱-بررسی جریان جت در جریان متقاطع

۲-آئرودینامیک محفظه احتراق

۳-جریان داخل لاینر محفظه و کانالهای دور آن

۴-جریان در سیستم دامپ دیفیوزر

می باشد. در زیر مرور کلی بر کارها انجام شده است که به صورت دسته بندی شده ارائه می گردد.

### ۱-۳-۱-جت در جریان متقاطع

جت در جریان متقاطع در بسیاری از کاربرد های مهندسی یافت می شود و بنابر این بررسی های مختلفی بر روی آن انجام گرفته است . بسیار ی از کارهای انجام شده شامل ایجاد تکنیکهای عددی مدلسازی مناسب برای کاربرد های متفاوت جت در جریان متقاطع است . بیشترین کاربرد این نوع جریان در محفظه احتراق توربین گاز چه در خنک کاری قشری و چه در ناحیه های ورودی محفظه احتراق است.

در محفظه احتراق علاوه بر خروج جت در یک جریان عرضی متقاطع ، بر خورد جتها با همدیگر و یا با دیواره و تاثیر متقابل آنها بر صعوبت کار می افزاید . یک مطالعه تجربی جامع در این زمینه توسط رودی و آنروپولوس[1] [4] انجام شده است . این کار اطلاعاتی را راجع به میدان جت خروجی به صورت عمودی در یک جریان متقاطع با نسبت سرعتهای متفاوت (سرعت جت به سرعت جریان اصلی ) معادل ۰/۵ و ۱ و ۲ ارائه می کند . در این زمینه اندازه گیریها یی در سرعتهای متوسط و سرعتهای توربولانسی در سه مولفه انجام شده است .

---

1-Anreopoulos&Rodi(1984)