دانشکدهٔ مهندسی هوافضا

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد
گرایش جلوبرنده

مدل‌نویسی ریاضی و شبیه‌سازی دینامیکی یک موتور با پیشران مایع سرمازا(کرایوژنیک)

استاد راهنما:

دکتر حسن کریمی مزرعه‌شاهی

استاد مشاور:

مهندس احسان‌اله طهماسبی

نگارش:

مه‌زاد چیت‌ساز

مهر ۱۳۹۰

تقدیم به همسرم؛ حسین

بامحبت و سپاس

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی هوافضا

تائیدیه هیأت داوران

هیأت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان:

مدل‌نویسی ریاضی و شبیه‌سازی دینامیکی یک موتور با پیشران مایع سرمازا(کرایوژنیک)

توسط خانم: **مه‌زاد چیت‌ساز** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشتهٔ: **هوافضا** گرایش: **پیشرانش** مورد تأئید قرار می‌دهند.

۱- استاد راهنما	جناب آقای دکتر حسن کریمی مزرعه‌شاهی	امضا:
۲-استاد مشاور	جناب آقای مهندس احسان‌اله طهماسبی	امضا:
۳- ممتحن داخلی	جناب آقای دکتر رضا ابراهیمی	امضا:
۴- ممتحن داخلی	جناب آقای دکتر مانی فتحعلی	امضا:
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	جناب آقای دکتر مانی فتحعلی	امضا:

اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان‌نامه: **مدل‌نویسی ریاضی و شبیه‌سازی دینامیکی یک موتور با پیشران مایع سرمازا(کرایوژنیک)**

استاد راهنما: **دکتر حسن کریمی مزرعه‌شاهی**

دانشجو: **مه‌زاد چیت‌ساز**

شماره دانشجویی: **۸۷۰۱۹۱۴**

اینجانب **مه‌زاد چیت‌ساز** دانشجوی دورهٔ **کارشناسی ارشد** مهندسی **هوافضا** گرایش: **پیشرانش** دانشکدهٔ **مهندسی هوافضا** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱) حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هر گونه کپی برداری به‌صورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکدهٔ **مهندسی هوافضا** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخهٔ تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲) کلیهٔ حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازهٔ کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

با احترام، مراتب قدردانی خود را به محضر

استاد راهنمای گرانقدر، جناب آقای دکتر حسن کریمی مزرعه‌شاهی

و **استاد مشاور گرامی، جناب آقای مهندس احسان‌اله طهماسبی**

تقدیم می‌دارم.

همچنین از همراهی و راهنمایی‌های ارزشمند دوستان گرامی جناب آقایان مهندس داوود رمش، مهندس بابک افضلی، مهندس علیرضا جلالی چیمه، مهندس مهیار نادری تبریزی، مهندس محمد امین اسکندری و مهندس مهرداد بختیاری سپاس‌گزاری می‌نمایم.

چکیده

یکی از مراحل با اهمیت طراحی و ساخت یک موتور، شبیه‌سازی آن است که به‌منظور پیش‌بینی رفتار سیستم در شرایط گوناگون رژیم کاری، عیب‌یابی و بهینه‌سازی آن و نیز کاهش تست‌های گرم و درنتیجه، کاهش هزینه‌های طراحی انجام می‌شود .در این پایان‌نامه موتور RD-۱۸۰ که یک موتور با پیشران مایع سرمازا و چرخه‌ی احتراق مرحله‌ای است به‌صورت دینامیکی شبیه‌سازی شده است. به این منظور پس از معرفی مختصر سامانه‌های پیشرانش موشکی و تعیین جایگاه موتور مـورد نظر، زیرمجموعه‌های اصلی آن شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته است. سپس مدل ریاضی فرآیندهای فیزیکی هر یک از زیرمجموعه‌های موتور و روش‌های حل عددی مناسب آن‌ها تعیین و درقالب کـد شبیه‌ساز یک موتور پیچیده با یکدیگر مرتبط شده است. برای تأیید درستی کد شبیه‌ساز، مشخصات عملکردی موتور در حالت نامی با مقـادیر واقعی آن مقایسه گـردیده است. درنهایت به‌وسیله‌ی کـد شبیه‌ساز، تأثیر تغییر ابعاد هندسی و عملکردی زیر مجموعه‌های موتور بر مشخصات عملکردی موتور ارائه و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: موتور با پیشران مایع سرمازا - مدل‌نویسی ریاضی - شبیه‌سازی - تحلیل دینامیکی - نتایج تحلیلی و تجربی

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه و کلیات ۲

۱-۱- آشنایی با انواع موتورهای عکس‌العملی ۳

۱-۲- دسته‌بندی سامانه‌های پیشرانش موشکی براساس نوع منبع انرژی ۴

۱-۲-۱- موتورهای پیشران جامد ۶

۱-۲-۲- موتورهای پیشران هیبرید ۶

۱-۲-۳- موتورهای پیشران مایع ۷

۱-۳- اهمیت شبیه‌سازی ریاضی مجموعه‌های موتور پیشران مایع ۱۴

۱-۳-۱- تاریخچه ۱۶

فصل ۲ : معرفی و بررسی عملکرد موتور RD-۱۸۰ ..... ۲۳

۲-۱- مقدمه ۲۳

۲-۲- معرفی زیرمجموعه‌های موتور RD-۱۸۰ ..... ۲۶

۲-۲-۱- مخازن ۲۶

۲-۲-۲- محفظه پیشرانش و مولد گاز ۲۷

۲-۲-۳- مجموعه توربوپمپ ۳۰

۲-۲-۴- لوله‌ها و شیرآلات ۳۱

۲-۳- بررسی عملکرد حالت نامی موتور RD-۱۸۰ ..... ۳۳

فصل ۳ : مدل‌نویسی ریاضی موتور پیشران مایع چرخه بسته ۳۶

۳-۱- مقدمه و کلیات ۳۶

۳-۱-۱- انواع روش‌های مدل‌نویسی ریاضی ۳۶

۳-۱-۲- اصول شبیه‌سازی یک موتور با پیشران مایع ۳۸

۳-۲- مدل‌نویسی ریاضی موتور با پیشران مایع ۳۸

۳-۲-۱- فرضیات ۳۹

۳-۲-۲- مدل ریاضی محفظه احتراق موتور و مولد گاز ۴۰

۳-۲-۳- مدل ریاضی سامانه توربوپمپ ۴۳

۳-۲-۴- لوله‌ها و مسیر عبور سیال و شیرآلات ۴۶

۳-۲-۵- خنک‌کاری محفظه احتراق ۵۱

فصل ۴ : شبیه‌سازی ریاضی موتور RD-۱۸۰ ..... ۵۹

۴-۱- مقدمه ۵۹

۴-۲- روش حل جریان سیال در مجاری موتورهای پیشران مایع ۶۰

۴-۲-۱- روش حل جریان در یک مدار ساده ۶۰

۴-۲-۲- روش حل جریان در انشعاب‌ها ۶۱

۴-۳- شبیه‌سازی موتور RD-۱۸۰ ..... ۶۳

۴-۴- شبیه‌سازی خنک‌کاری محفظه احتراق ۶۷

فصل ۵ : تحلیل دینامیکی نتایج شبیه‌سازی موتور RD-۱۸۰ ..... ۷۳

۵-۱- مقدمه ۷۳

۵-۲- بررسی نتایج شبیه‌سازی عملکرد نامی موتور ۷۴

۵-۳- بررسی تأثیر تغییر ابعاد هندسی و عملکردی زیر مجموعه‌های موتور بر عملکرد سامانه ۸۰

۵-۳-۱- بررسی تأثیر تغییر مساحت گلوگاه محفظه‌ی احتراق بر عملکرد موتور ۸۰

۵-۳-۲- بررسی تأثیر تغییر مقدار نامی سرعت زاویه‌ای توربوپمپ بر عملکرد موتور ۸۴

۵-۳-۳- بررسی تأثیر تغییر ضریب جریان انژکتورهای اکسنده‌ی محفظه‌ی احتراق بر عملکرد موتور ۸۸

۵-۳-۴- بررسی تغییر ضریب جریان انژکتورهای سوخت محفظه‌ی احتراق بر عملکرد موتور ۹۰

۵-۳-۵- بررسی تأثیر تغییر ضریب جریان انژکتورهای سوخت مولدگاز ۹۱

۵-۴- نتیجه‌گیری ۹۴

۵-۵- پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده ۹۵

پیوست ۹۷

پیوست ۱: مشخصات فنی و بررسی عملکرد موتور RD-۱۸۰ ..... ۹۸

مقدمه: ۹۸

اطلاعات عمومی موتور ۹۹

شرح ساختار موتور RD-۱۸۰ ..... ۱۰۲

عملکرد موتور ۱۰۵

محفظه‌ی احتراق ۱۰۶

پیوست ۲: روش محاسبه انتقال حرارت جابجایی محفظه احتراق ۱۱۳

مقالات ارائه شده: ۱۱۸

مراجع: ۱۱۹

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ مدار پنوماهیدرولیکی موتور RD-۱۸۰ ..... ۲۴

شکل۳-۱ ضرایب جریان برای اوریفیس های هم مرکز..... ۵۱

شکل ۳-۲ نمای کانال های خنک کاری فرزکاری و کاروگیتی ۵۶

شکل ۴-۱ یک مدار هیدرولیکی ساده..... ۶۰

شکل ۴-۲ یک مدار هیدرولیکی انشعابی ۶۱

شکل ۴-۳ مدار پنوماهیدرولیکی موتور RD-۱۸۰..... ۶۴

شکل ۴-۴ تغییرات S بر حسب نسبت اکسنده به سوخت در کناره دیواره محفظه احتراق ۶۹

شکل ۵-۱ نمودار فشارمحفظه ی احتراق بر حسب زمان درحالت نامی ۷۴

شکل ۵-۲ نمودار فشار محفظه ی مولدگاز بر حسب زمان در حالت نامی..... ۷۵

شکل ۵-۳ نمودار سرعت زاویه ای توربوپمپ بر حسب زمان در حالت نامی..... ۷۵

شکل ۵-۴ پروفیل هندسی محفظه احتراق ۷۷

شکل ۵-۵ پروفیل شار حرارتی در طول مسیر محفظه ی احتراق..... ۷۷

شکل ۵-۶ پروفیل دمای سیال خنک کننده در طول مسیر خنک کاری محفظه ی احتراق ۷۸

شکل ۵-۷ پروفیل دمای دیواره ی محفظه ی احتراق در مجاورت محصولات گازی احتراق..... ۷۸

شکل ۵-۸ پروفیل دمای دیواره ی محفظه ی احتراق در مجاورت سیال خنک کننده ۷۸

شکل ۵-۹ تغییرات فشار محفظه احتراق(۱) با تغییر مساحت گلوگاه محفظه احتراق..... ۸۱

شکل ۵-۱۰ تغییرات فشار محفظه احتراق(۲) با تغییر مساحت گلوگاه محفظه احتراق ۸۱

شکل ۵-۱۱ تغییرات فشار محفظه ی مولدگاز با تغییر مساحت گلوگاه محفظه احتراق ۸۲

شکل ۵-۱۲ تغییرات فشار محفظه احتراق با تغییر سرعت زاویه ای نامی توربوپمپ..... ۸۵

شکل ۵-۱۳ تغییرات فشار محفظه ی مولدگاز با تغییر سرعت زاویه ای نامی توربوپمپ..... ۸۵

شکل ۵-۱۴ تغییرات نیروی پیشرانش موتور با تغییر سرعت زاویه ای نامی توربوپمپ ۸۶

شکل ۵-۱۵ تغییرات بازده توربین با تغییر سرعت زاویه ای نامی توربوپمپ..... ۸۷

شکل ۵-۱۶ تغییرات فشار محفظه احتراق(۱) با تغییر ضریب جریان انژکتورهای اکسنده ی محفظه احتراق ۸۸

شکل ۵-۱۷ تغییرات فشار محفظه احتراق(۲) با تغییر ضریب جریان انژکتورهای اکسنده ی

محفظه احتراق.....۸۹

شکل ۵-۱۸ تغییرات فشار محفظه ی مولدگاز با تغییر ضریب جریان انژکتورهای اکسنده ی محفظه احتراق.....۸۹

شکل ۵-۱۹ تغییرات فشار محفظه ی احتراق با تغییر ضریب جریان انژکتورهای سوخت مولدگاز۹۲

شکل ۵-۲۰ تغییرات فشار محفظه ی مولدگاز با تغییر ضریب جریان انژکتورهای سوخت مولدگاز ۹۳

شکل ۵-۲۱ تغییر سرعت زاویه ای توربوپمپ با تغییر ضریب جریان انژکتورهای سوخت مولدگاز ۹۳

شکل پ ۱-۱ شمای موتور RD-۱۸۰.....۱۰۱

شکل پ ۱-۲ مدار پنوماهیدرولیکی موتور RD-۱۸۰ .....۱۰۲

شکل پ ۱-۳ شمای موتور RD-۱۸۰ .....۱۰۴

شکل پ ۱-۴ شمای محفظه ی احتراق ۱۰۷

شکل پ ۱-۵ طرح ورود سوخت به مسیر خنک کننده محفظه ۱۰۸

شکل پ ۱-۶ شمای انژکتور.....۱۱۱

فهرست جداول

جدول ۵-۱ مشخصات عملکردی موتور RD-۱۸۰ در حالت نامی ۷۳

جدول ۵-۲ نتایج مشخصات عملکردی کد شبیه‌ساز و خطای نسبی انحراف از مقدار میانگین ۷۵

جدول ۵-۳ خطای نسبی مشخصات عملکردی موتور در حالت نامی..... ۷۶

جدول ۵-۴ تغییرات ایجاد شده در اثر تغییر مساحت گلوگاه محفظه‌ی احتراق ۱ ..... ۸۳

جدول ۵-۵ تغییرات ایجاد شده در اثر تغییر همزمان مساحت گلوگاه محفظه‌های احتراق..... ۸۴

جدول ۵-۶ تغییرات مشخصات عملکردی موتور در اثر تغییر ۵ درصدی سرعت زاویه‌ای نامی توربوپمپ..... ۸۷

جدول ۵-۷ تغییرات مشخصات عملکردی موتور در اثر تغییر ۱۰ درصدی سرعت زاویه‌ای نامی توربوپمپ..... ۸۷

جدول ۵-۸ تغییر مشخصات عملکردی موتور با تغییر ضریب جریان انژکتورهای اکسنده‌ی محفظه احتراق..... ۹۰

جدول ۵-۹ تغییر مشخصات عملکردی موتور با تغییر ضریب جریان انژکتورهای سوخت محفظه‌ی احتراق..... ۹۱

جدول ۵-۱۰ تغییر مشخصات عملکردی موتور با تغییر ضریب جریان انژکتورهای سوخت مولد گاز ۹۳

جدول پ ۱-۱ مشخصات فنی و اصلی موتور..... ۱۰۱

جدول پ ۱-۲ مشخصات فنی محفظه احتراق..... ۱۰۷

فهرست علائم و اختصارات

A_t	سطح مقطع گلوگاه مولد گاز و محفظه‌احتراق
C	ضریب تخلیه‌ی اوریفیس
C_0	ضریب صدور جسم سیاه
C^*	سرعت مشخصه
C_{ad}	سرعت آدیاباتیک
D_{mean}	قطر متوسط پره‌های توربین
D_h	قطر هیدرولیکی
EL	لوله (المان)
F	نیروی پیشرانش موتور
f	ضریب اصطکاک لوله
g_0	گرانش زمین
H	هد پمپ
H_n	هد نامی پمپ
h_f	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال خنک‌کننده
h_g	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محصولات گازی
$h_{cent,g}$	آنتالپی محصولات احتراق در مرکز محفظه احتراق
$h_{wall,g}$	آنتالپی محصولات احتراق در کنار دیواره‌ی محفظه احتراق
I_{sp}	ضربه‌ی ویژه
J_{eq}	ممان اینرسی معادل توربوپمپ
k	ضریب آدیاباتیک
K	ضریب جریان معادل اوریفیس
k_z	ضریب تأثیر تعداد پره

L^*	طول مشخصه
$\dot{m}_{gg}$	دبی جرمی عبوری از محفظه احتراق مولد گاز
$\dot{m}_{ox}$	دبی جرمی اکسنده
$\dot{m}_{fu}$	دبی جرمی سوخت
$\dot{m}_{cc}$	دبی جرمی عبوری از محفظه احتراق موتور
$\dot{m}_{in}$	دبی جرمی پیشران ورودی به محفظه‌ی احتراق
$\dot{m}_{out}$	دبی جرمی پیشران خروجی از محفظه‌ی احتراق
Nu	عدد ناسلت
P	محیط مقطع محفظه‌ی احتراق
Pr	عدد پرانتل
P_{cc}	فشار محفظه احتراق
P_e	فشار محیط
P_{gg}	فشار مولد گاز
$P_{t-ratio}$	نسبت فشار توربین
P^*	فشار گاز در سرعت صوت
Re	عدد رینولدز
$TQ_{turbine}$	گشتاور تولیدی توربین
TQ_{pump}	گشتاور مصرفی پمپ
q_n	ضریبی در محاسبه هد پمپ
Q	دبی حجمی
Q_n	دبی حجمی نامی
R	ثابت گازی
T	دما

$T_{wall,g}$	دمای دیواره‌ی محفظه‌ی احتراق
T^*	دمای گاز در سرعت صوت
U	سرعت محوری پره توربین در قطر متوسط
W_{sp}	کار آدیاباتیک
τ_{ch}	زمان انجام واکنش‌های شیمیایی
τ_S	زمان ورود پیشرانه به محفظه تا شروع تبخیر
τ_{vap}	زمان تبخیر پیشرانه
ε	زمان گذر گاز از محفظه‌ی احتراق
$\varepsilon_{wall,e}$	ضریب مؤثر دیواره‌ی داخلی
ε_g	قابلیت انتشار محصولات احتراق
μ_f	لزجت سیال خنک‌کننده
δ_{wall}	ضخامت دیواره‌ی محفظه‌احتراق
ΔP_f	افت فشار ناشی از اصطکاک
ΔP_R	افت فشار ناشی از مقاومت‌های مسیر
ρ	چگالی گاز
ρ^*	چگالی گاز در سرعت صوت
ρ_x	چگالی مشخصه‌ی محصولات گازی
β_2	زاویه خروجی پره پمپ
η_{pump}	بازده پمپ
η_n	راندمان نامی پمپ
η_h	راندمان هیدرولیکی نامی پمپ
$\eta_{turbine}$	بازده توربین
λ	ضریب هدایت حرارتی

ω	سرعت زاویه‌ای توربوپمپ

فصل ۱

مقدمه و کلیات

فصل ۱ : مقدمه و کلیات

امـروزه یکی از نمـودهای پیشرفت علم و تکنولوژی در یک کشور، روند رو به رشد صنایع هوا فضا، بـه‌ویژه صنعت موشکی آن کشور به‌شمار می‌آید. ساخت یک موشک، نیازمند تکنولوژی طراحی و ساخت بسیار پیچیده و به‌روز است که حاصل سطح آموزشی بالا، تحقیقات و فناوری بسیار پیشرفته محسوب می‌شود. بنابراین برای پیوستن به کشورهای پیشرو در صنعت هوا فضا، پیمودن مجموعه ای از مراحل شامل ایجاد تئوری‌ها، انجام تحقیقات تئوری، مدل‌نویسی، نمونه‌سازی و پیشرفت و به روزآوری مداوم این مباحث، لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد.

شبیه‌سازی یک موتور، یکی از مراحل با اهمیت طراحی و ساخت یک موتور موشکی است که به‌منظور پیش‌بینی رفتار سیستم در شرایط گوناگون رژیم کاری، عیب‌یابی و بهینه‌سازی آن و نیز کاهش تست‌های گرم و درنتیجه، کاهش هزینه‌های طراحی انجام می‌پذیرد.

در این پایان‌نامه، یک موتور چرخه بسته با پیشران مایع سرمازا، به‌صورت دینامیکی شبیه‌سازی می‌شود. در فصل اول برای آشنایی با جایگاه موتور مورد نظر، انواع موتورهای عکس‌العملی(شامل موتورهای موشکی)، دسته‌بندی سامانه‌های موشکی و جایگاه موتورهای موشکی پیشران مایع معرفی مـی‌شود. سپس موتورهای پیشران مایع از دیدگاه‌های متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتها به اهمیت مدل‌نویسی و شبیه‌سازی ریاضی موتورهای موشکی و تاریخچه‌ی آن پرداخته خواهد شد.

در فصل دوم، موتور موشکی پیشران مایع مورد نظر و زیرسیستم‌های آن معرفی می‌گردد و وظیفه هر یک‌از آن‌ها به‌اختصار شرح داده می‌شود. در فصل سوم، پس از معرفی انواع روش‌های مدل‌نویسی موتورهای پیشران مایع، نحوه‌ی به‌دست آوردن معادلات ریاضی دینامیکی زیر سیستم‌های موتور مذکور، با استفاده از قوانین بقای جرم و انرژی و معادلات دینامیک گازی، شرح داده می‌شود.

در فصل چهارم، مراحل شبیه‌سازی موتور مورد نظر، برپایه دنبال کردن سیال با استفاده از معادلات