

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی هوافضا

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی هوافضا-آیرودینامیک

عنوان پایان نامه

مدل سازی و بررسی تجربی پاشش در محفظه احتراق میکروموتور موشک سوخت
مایع

نگارنده

محمد نجفی

استاد راهنما

دکتر امّی

بهار ۱۳۸۹



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای محمد نجفی پایان نامه 6 واحدی خود را با عنوان مدل سازی و بررسی تجربی پاشش در محفظه احتراق میکروموتور موشک سوخت مایع در تاریخ ۱۳۸۹/۳/۱۷ 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 - موافقا پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر فتح اله امی	استادیار	
استاد مشاور	مهندس وحید فرج پور	مربی	
استاد ناظر	دکتر بهزاد قدیری دهکردی	دانشیار استادیار	
استاد ناظر	دکتر مهدی اشجعی	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر بهزاد قدیری دهکردی	دانشیار استادیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه ارسال مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری 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 هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجوی مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب و یا نرم افزار و یا آثار ویژه حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

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

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

آیین نامه چاپ پایان نامه (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 می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» 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 محمد نجفی در رشته مهندسی هوافضا - آیرودینامیک است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر فتح الله امی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

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

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

ماده ۶: اینجانب محمد نجفی دانشجوی رشته مهندسی هوافضا - آیرودینامیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: محمد نجفی

تاریخ و امضا: ۱۳۸۹/۳/۱





دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی هوافضا

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی هوافضا-آیرودینامیک

عنوان پایان نامه

مدل سازی و بررسی تجربی پاشش در محفظه احتراق میکروموتور موشک سوخت
مایع

نگارنده

محمد نجفی

استاد راهنما

دکتر امّی

بهار ۱۳۸۹

تقدیم به مادر مهربانم و روح پدر گرامی ام....

آئینه‌های فداکاری، عاطفه و پارسایی؛

که زندگیم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر

دیروز

گرم از تابش مهر مادر و پرتوان از استقامت پدر، در سایه سرو قامتشان جان گرفتم و

امروز

فروتنانه گلبرگی از آموخته‌هایم را به پابوسشان می‌افکنم .

سپاس‌گذاری

نهایت تقدیر و کمال تشکر از استاد گرانقدر

جناب آقای دکتر فتح‌الله امّی بخاطر راهنمایی‌های بی دریغ در پیشبرد و به پایان رساندن این پژوهش

را دارم و موفقیت ایشان را در تمام مراحل زندگی از خداوند متعال خواستارم و از راهنمایی‌های جناب

آقای مهندس وحید فرج‌پور در پیشبرد این پژوهش و همچنین از آقای محمّد طاهری که در انجام

آزمایشات کمک بزرگی به بنده نمودند تشکر فراوانی بعمل می‌آورم.

چکیده

فرآیند پاشش و بهینه‌سازی آن در محفظه احتراق موتور موشک، یکی از اساسی‌ترین پارامترها در فرآیند احتراق، پایداری پروسه احتراق و میزان نیروی پیشرانش می‌باشد که بستگی به عواملی چون: نوع انژکتور مورد استفاده، چیدمان انژکتورها در صفحه انژکتور و نوع محفظه احتراق دارد. توزیع نامتعادل و غیریکنواخت سوخت و اندازه و سرعت نامطلوب ذرات اسپری، سبب ایجاد مخروط پاشش نامتقارن و احتراق ناقص می‌شود که در حالت بحرانی شکستگی و انفجار محفظه را به دنبال خواهد داشت.

در این تحقیق به منظور بررسی دقیق پاشش در یک میکروموتور موشک، ابتدا مفاهیم و کلیاتی شامل انژکتور، صفحه انژکتور، تئوری شکست جت و اتمیزاسیون و پارامترهای اسپری سیال اتمیزه شده بیان شده است. سپس با طراحی و ساخت مدل محفظه احتراق، به بررسی تجربی و عددی پارامترهای پاشش از دیدگاه ماکروسکوپی و میکروسکوپی پرداخته شده است که در این راستا به جهت مزایا و کاربرد وسیع انژکتورهای دو پایه گریز از مرکز و بدلیل توزیع و یکنواختی پاشش مطلوبتر در صفحه انژکتور دایروی که در تحقیقات پیشین صورت گرفته، استفاده شده است. برای اطمینان از عملکرد سیستم پاشش و مشخصه‌های اسپری که در آزمایشگاه تست سرد و آزمایشگاه PDA^1 اندازه‌گیری شده‌اند، نتایج این آزمایشات در نهایت با نتایج مدل‌سازی حاصل از نرم افزار FLUENT و تحقیقات پیشینیان مورد مقایسه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: پاشش، اسپری، انژکتور، صفحه انژکتور، محفظه احتراق، موشک سوخت مایع

¹ Phase Doppler Analyzer

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	أ
فهرست جدول ها	ه
فهرست شکل ها	و
فهرست علائم و نشانه ها	ط
فهرست اختصارات	ک

فصل اول :

۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ موتور موشک سوخت مایع	۲
۳-۱ مروری بر مطالعات انجام شده	۳

فصل دوم :

۱-۲ مقدمه	۱۱
۲-۲ بررسی تجربی و مشخصه‌های عملکرد پاشش	۱۱
۳-۲ تئوری شکست جت و اتمیزاسیون	۱۲
۴-۲ رژیم‌های شکست قطره	۱۴
۵-۲ ساختار اسپری - مخروطی	۱۶
۶-۲ پارامترهای اسپری سیال اتمیزه شده	۱۸
۱-۶-۲ پارامترهای ماکروسکوپی اسپری	۱۸
۱-۱-۶-۲ دبی سیال	۱۸
۲-۱-۶-۲ زاویه اسپری	۱۹
۳-۱-۶-۲ میزان نفوذ اسپری	۱۹
۴-۱-۶-۲ توزیع قطرات در اسپری	۲۰

۲-۶-۲ پارامترهای میکروسکوپی اسپری	۲۱
۱-۲-۶-۲ مفهوم کمیت اتمیزاسیون	۲۱
۲-۲-۶-۲ طیف قطری ذرات در اسپری	۲۲
۳-۲-۶-۲ قطر متوسط قطرات	۲۲
۷-۲ فرآیند انتشار سوخت	۲۴

فصل سوم : مدل آزمایشگاهی ۲۶

۱-۳ مقدمه	۲۷
۲-۳ متعلقات محفظه احتراق موتور موشک سوخت مایع	۲۸
۳-۳ انژکتور	۲۹
۴-۳ صفحه انژکتور و ویژگی‌های مطلوب آن	۳۰
۵-۳ انواع محفظه احتراق	۳۱
۱-۵-۳ محفظه احتراق سیلندری	۳۱
۲-۵-۳ محفظه احتراق مخروطی	۳۲
۳-۵-۳ محفظه احتراق کروی	۳۳
۴-۵-۳ محفظه احتراق حلقوی	۳۴
۶-۳ ضوابط محفظه احتراق	۳۴
۷-۳ فاکتورهای مهم در طراحی محفظه احتراق	۳۵
۸-۳ روشهای تعیین سطح مقطع محفظه احتراق	۳۶
۹-۳ ساخت مدل آزمایشگاهی	۳۸

فصل چهارم : نتایج تست تجربی ۴۰

۱-۴ مقدمه	۴۱
-----------------	----

- ۲-۴ مجموعه تست سرد پاشش ۴۱
- ۳-۴ انتخاب سیال اکسیدکننده و احیاکننده ۴۳
- ۴-۴ محاسبات مربوط به صفحه انژکتور طراحی شده ۴۴
- ۵-۴ مطالعه پارامترهای پاشش تست سرد ۴۷
- ۱-۵-۴ تست دبی-فشار ۴۷
- ۲-۵-۴ تست یکنواختی پاشش ۴۸
- ۳-۵-۴ تست زاویه اسپری پاشش ۴۸
- ۶-۴ آزمون توزیع دبی در کلکتورها بر حسب فشار ۵۰
- ۷-۴ بررسی پارامترهای پاشش توسط دستگاه PDA ۵۳
- ۱-۷-۴ تست سرعت و تعیین قطر اسپری توسط دستگاه PDA ۵۴
- ۸-۴ تاثیر فاصله صفحه انژکتور تا کلکتور بر پاشش ۵۸
- ۹-۴ تحلیل نتایج تجربی ۵۸

فصل پنجم : مدل پاشش و مقایسه با نتایج تجربی ۶۱

- ۱-۵ مقدمه ۶۲
- ۲-۵ مدل سازی هندسی و شبکه بندی محفظه احتراق ۶۳
- ۳-۵ انتخاب Solver برای حل میدان جریان ۶۴
- ۴-۵ انتخاب مدل توربولانسی ۶۷
- ۵-۵ مدل فاز گسسته ۶۸
- ۶-۵ تئوری مدل اسپری ۶۹
- ۷-۵ انواع شرط مرزی در فاز گسسته ۷۰
- ۸-۵ معادلات حرکت ۷۳
- ۱-۸-۵ معادله بقای جرم ۷۴
- ۲-۸-۵ معادله بقای مومنتوم ۷۴

- ۷۵ ۳-۸-۵ معادله انرژی
- ۷۵ ۴-۸-۵ معادله انتقال گونه‌های شیمیایی در جریانهای چندفازی
- ۷۶ ۹-۵ نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

فصل ششم: نتایج و پیشنهادات ۸۴

- ۸۵ ۱-۶ مقدمه
- ۸۵ ۲-۶ مقایسه نتایج عددی با تجربی و تحقیقات پیشین
- ۸۸ ۳-۶ تحلیل نتایج و نتیجه‌گیری
- ۸۹ ۴-۶ پیشنهادات برای ادامه کار
- ۹۰ منابع و مراجع

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۴ دبی جرمی اکسیدکننده و احیاکننده در کلکتورها برای $P_o = 4(bar)$ و $P_f = 10(bar)$	۵۲
جدول ۲-۴ دبی جرمی اکسیدکننده و احیاکننده در کلکتورها برای $P_o = 6(bar)$ و $P_f = 8(bar)$	۵۲
جدول ۳-۴ توزیع دبی بر حسب تغییر فشار انژکتور	۵۳
جدول ۴-۴ مشخصات تنظیم دستگاه PDA برای انژکتور مورد نظر	۵۴
جدول ۵-۴ نتایج حاصل از تست PDA برای فشارهای $P_o = 6(bar)$ و $P_f = 8(bar)$	۵۵
جدول ۶-۴ نتایج حاصل از تست PDA برای فشارهای : $P_o = 4(bar)$ و $P_f = 10(bar)$	۵۶
جدول ۱-۶ مقایسه قطر و سرعت قطرات حل عددی و تجربی	۸۶

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ تغییر ضخامت سیال پاشش و اندازه قطرات نسبت به فشار انژکتور	۴
شکل ۲-۱ تغییرات زاویه پاشش نسبت به فشار انژکتور	۴
شکل ۳-۱ تابع چگالی احتمال اندازه قطرات برای انژکتور با نازل ۷۰ درجه	۵
شکل ۴-۱ انژکتور بکار برده شده توسط واسلر و اشکریز	۸
شکل ۵-۱ منحنیهای تراز مربوط به قطر قطرات	۸
شکل ۶-۱ منحنیهای تراز مربوط به تعداد در واحد حجم ذرات	۸
شکل ۷-۱ منحنیهای تراز مربوط به سرعت قطرات	۹
شکل ۸-۱ کانتور توزیع سرعت کل در خروجی از نازل (m/s)	۹
شکل ۹-۱ تغییرات قطر متوسط قطرات (بر حسب میکرون) در طول محور انژکتور	۹
شکل ۱-۲ رژیم‌های مختلف شکست جت با توجه به عدد Re و $Z(OH)$	۱۵
شکل ۲-۲ دیاگرام اونسرگ: رژیم‌های شکست جت	۱۵
شکل ۳-۲ رژیم‌های شکست اسپری مخروطی شکل	۱۶
شکل ۴-۲ ساختار اسپری مخروطی - شکل	۱۷
شکل ۵-۲ نمایش زاویه مخروط پاشش اسپری	۱۹
شکل ۶-۲ ساختار و قسمت‌های مختلف یک اسپری	۲۰
شکل ۷-۲ نحوه توزیع قطری قطرات در یک اسپری	۲۲
شکل ۱۱-۳ اجزا موتور موشک سوخت مایع	۲۸
شکل ۲-۳ نمونه انژکتور مورد استفاده در آزمایش	۳۰
شکل ۳-۳ صفحه انژکتور با آرایش دایروی	۳۱
شکل ۴-۳ نمای برش خورده محفظه احتراق	۳۱
شکل ۵-۳ محفظه احتراق سیلندری	۳۲
شکل ۶-۳ محفظه احتراق مخروطی	۳۲
شکل ۷-۳ محفظه احتراق کروی	۳۳

- شکل ۳-۸ محفظه احتراق حلقوی ۳۳
- شکل ۳-۹ محفظه احتراق ترکیبی سیلندری - کرووی ۳۴
- شکل ۳-۱۰ مقایسه طول محفظه احتراق در یک حجم ثابت ۳۶
- شکل ۳-۱۱ اندازه‌های واقعی موتورهای RD - 105, RD - 106 ۳۷
- شکل ۳-۱۲ ابعاد محفظه احتراق آزمایشگاهی ۳۹
- شکل ۴-۱۱ استند نگه دارنده متعلقات محفظه احتراق ۴۱
- شکل ۴-۲ کلکتورهای قطاعی و شعاعی ۴۲
- شکل ۴-۳ آزمایشگاه تست هیدرودینامیک پاشش ۴۳
- شکل ۴-۴ تغییرات دبی انژکتور خارجی نسبت به اختلاف فشار ۴۷
- شکل ۴-۵ تغییرات دبی انژکتور داخلی نسبت به اختلاف فشار ۴۷
- شکل ۴-۶ توزیع دبی اسپری انژکتور نمونه در جهت θ ۴۸
- شکل ۴-۷ زاویه پاشش در انژکتورهای داخلی و خارجی ۴۹
- شکل ۴-۸ نمایش برخورد چترهای پاشش ۴۹
- شکل ۴-۹ نمایش چتر پاشش صفحه انژکتور مورد آزمون در $P_o = 4(bar)$ و $P_f = 10(bar)$ ۵۰
- شکل ۴-۱۰ نمایش چتر پاشش درون محفظه احتراق مورد آزمون در $P_o = 4(bar)$ و $P_f = 10(bar)$ ۵۰
- شکل ۴-۱۱ توزیع دبی دو اسپری پاشش در کلکتور قطاعی ($P_o = 4(bar)$ و $P_f = 10(bar)$) ۵۱
- شکل ۴-۱۲ توزیع دبی دو اسپری پاشش صفحه انژکتور ($P_o = 6(bar)$ و $P_f = 8(bar)$) در جهت θ ۵۱
- شکل ۴-۱۳ درصد توزیع دبی دو اسپری پاشش در کلکتور قطاعی ($P_o = 4(bar)$ و $P_f = 10(bar)$) ۵۲
- شکل ۴-۱۴ درصد توزیع دبی دو اسپری پاشش در کلکتور قطاعی ($P_o = 6(bar)$ و $P_f = 8(bar)$) ۵۳
- شکل ۴-۱۵ قطر متوسط برای مقادیر فشار $P_o = 6(bar)$ و $P_f = 8(bar)$ در راستای X ۵۷
- شکل ۴-۱۶ قطر متوسط و SMD برای مقادیر فشار $P_o = 6(bar)$ و $P_f = 8(bar)$ در راستای X ۵۷
- شکل ۴-۱۷ قطر متوسط برای مقادیر فشار $P_o = 4(bar)$ و $P_f = 10(bar)$ در راستای X ۵۷
- شکل ۴-۱۸ قطر متوسط و SMD برای مقادیر فشار $P_o = 4(bar)$ و $P_f = 10(bar)$ در راستای X ۵۸
- شکل ۴-۱۹ تاثیر فاصله بر توزیع دبی مجموع دو سیال بدست آمده از کلکتور شعاعی ۵۸
- شکل ۵-۱-۱ صفحه انژکتور دایروی و نحوه چیدمان انژکتورها و مدل ابعادی محفظه احتراق ۶۳

- شکل ۵-۲- مدل شبکه‌بندی شده محفظه احتراق بروش شبکه‌های ساختاری ۶۴
- شکل ۵-۳- دیاگرام الگوریتمهای حلگر بر اساس فشار در دو حالت مجزا و کوپل ۶۶
- شکل ۵-۴- شرط مرزی انعکاسی برای فاز گسسته ۷۰
- شکل ۵-۵- شرط مرزی تله‌ای برای فاز گسسته ۷۱
- شکل ۵-۶- شرط مرزی رهایی در فاز گسسته ۷۱
- شکل ۵-۷- شرط مرزی جت-دیواره برای فاز گسسته سیال ۷۳
- شکل ۵-۸- چیدمان و مش‌بندی انژکتورها در مدل محفظه احتراق ۷۷
- شکل ۵-۹- چتر پاشش و پروفیل سرعت در انژکتور میانی ۷۷
- شکل ۵-۱۰- کانتور اندازه سرعت برای پاشش تک انژکتور ۷۸
- شکل ۵-۱۱- کانتور اندازه سرعت برای پاشش تک انژکتور (نما از بالا) ۷۸
- شکل ۵-۱۲- کانتور سرعت پاشش انژکتور در مختصات (X,Y,Z) ۷۹
- شکل ۵-۱۳- نمودار تغییر سرعت قطرات بر حسب زمان ۷۹
- شکل ۵-۱۴- چتر پاشش تمام انژکتورها قبل از برخورد چترهای پاشش ۸۰
- شکل ۵-۱۵- برخورد چترهای پاشش پس از همگرایی کامل ۸۰
- شکل ۵-۱۶- نمایش چتر پاشش درون محفظه احتراق پس از همگرایی کامل ۸۱
- شکل ۵-۱۷- کانتور سرعت برای انژکتورهای خطی صفحه انژکتور ۸۱
- شکل ۵-۱۸- جریان کاملا توسعه یافته چترهای پاشش درون محفظه احتراق ۸۲
- شکل ۵-۱۹- نمودار تغییرات سرعت در راستای y (V_{mean}) ۸۲
- شکل ۵-۲۰- چتر پاشش و پروفیل قطر قطرات اسپری ناشی از برخورد دو اسپری ۸۳
- شکل ۵-۲۱- نمودار تغییر قطر قطرات بر حسب زمان ۸۳
- شکل ۶-۱- مقایسه نتایج حاصل از PDA با نتایج عددی برای فشار $P_o = 6(bar)$ و $P_f = 8(bar)$ ۸۵
- شکل ۶-۲- مقایسه نتایج حاصل از PDA با نتایج عددی برای فشار $P_o = 4(bar)$ و $P_f = 10(bar)$ ۸۶
- شکل ۶-۳- مقایسه کانتور سرعت برای یک انژکتور با نتایج وسالو (Vessalo, P.) ۸۷

فهرست علائم و نشانه‌ها	
D	نیروی پسا (مقاومت)
ρ	جرم حجمی (چگالی)
A	سطح مقطع
V	سرعت سیال
C_d	ضریب درگ
Re	عدد رینولدز
μ	ویسکوزیته سیال
μ_t	ویسکوزیته توربولانسی
We	عدد بی بعد وبر
Z	عدد بی بعد آنسرگ
δ	کشش سطحی
Q	دبی حجمی
k_m	نسبت ترکیبات واقعی
q	شدت دبی سوخت
ϕ_β	ضریب دبی
F_K	سطح مقطع محفظه احتراق
F_{KP}	سطح گلوگاه نازل
\dot{m}	دبی جرمی
P_K	فشار محفظه احتراق
T	دما
γ	نسبت چگالی
μ_i	ضریب دبی
λ	ضریب اصطکاک سیال
α	زاویه پاشش
β	سرعت مشخصه
I_s	ایمپالس ویژه
k	ضریب هدایت گرمایی
ε	نرخ اتلاف
\bar{u}	سرعت متوسط سیال

u'_t	سرعت اغتشاشی سیال
g	شتاب گرانش
ψ	زاویه ترک قطره پس از برخورد
S_m	ترم چشمه
$\bar{\tau}$	تانسور تنش
E	انرژی
h	انتالپی
Y_j	کسر جرمی ز نوع ماده

فهرست اختصارات

PDA	Phase Doppler Analyzer(Anemometer)
LBV	Laser-Base Visualization
PIV	Particle Image Velocimetry
PDF	Probability Density Function
PDPA	Phase Doppler Particle Analyzer
FVD	Fluid Volume Method
VMD	Volumetric Mean Diameter
SMD	Sauter Mean Diameter
CFD	Computational Fluid Dynamics
PBS	Pressure-Base Solver
DBS	Density-Base Solver
DPM	Discrete Phase Model
TAB	Taylor Analogy Break-up
CDE	Convection Diffusion Equation