دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

عنوان پایان نامه :

بررسی عوامل موثر بر جانمایی محل تزریق گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی به روشهای عددی و تجربی

تهیه و تنظیم:

پیمان باشی شهابی

استاتید راهنما:

دکتر سید محمدرضا مدرس رضوی

دکتر حمید نیازمند

ارائه شده جهت اخذ درجه دکتری تخصصی

در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

بهمن ماه ۱۳۸۹

اظهارنامه

اینجانب **پیمان باشی شهابی** دانشجوی دوره دکتری/کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده رساله/پایان نامه ***بررسی عوامل موثر بر جانمایی محل تزریق گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی به روشهای عددی و تجربی*** تحت راهنمایی آقایان دکتر محمدرضا مدرس رضوی و دکتر حمید نیازمند متعهد می‌شوم:

تحقیقات در این رساله/پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

مطالب مندرج در رساله/پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه فردوسی مشهد » و یا « Ferdowsi University of Mashhad » به چاپ خواهد رسید.

حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله/پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله/ پایان نامه رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله/پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

برای تمام زحماتی که در طول این سالها
برایم کشیده‌اند

بسمه تعالی

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله/پایان نامه: بررسی عوامل موثر بر جانمایی محل تزریق گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی به روشهای عددی و تجربی

نام نویسنده: پیمان باشی شهابی

نام استاد(ان) راهنما: دکتر محمدرضا مدرس رضوی و دکتر حمید نیازمند

نام استاد(ان) مشاور: _____

دانشکده: مهندسی	گروه: مکانیک	رشته تحصیلی: مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی
تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۱۰/۲		تاریخ دفاع: ۱۳۸۹/۱۰/۱۰
مقطع تحصیلی:کارشناسی ارشد ○ دکتری ●		تعداد صفحات:

چکیده رساله/پایان نامه :

امروزه مشخص شده است که استفاده از روش بازگردانی دود (EGR) به منظور کنترل و کاهش اکسیدهای ازت (NO_x) در موتورهای احتراق داخلی، کاملا اثر بخش و موثر بوده است. اگر روش بازگردانی دود به درستی و با دقت به خدمت گرفته نشود, به کاهش قابل ملاحظه توان موتور و افزایش سایر آلاینده‌های موتور منجر خواهد شد. یکی از دلایل بروز این مشکل عدم توزیع نسبتا یکنواخت دود بازگردانده شده در راهگاههای ورودی برای هر سیلندر است. از این رو به کارگیری سیستمی که دود بازگردانده شده را به شکل مناسبی بین راهگاههای ورودی سیلندر توزیع نماید اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. از طرف دیگر قوانین آلایندگی موجود به تولید کنندگان موتور اجازه نمی‌دهد که گازهای رخنه‌ای (blowby) تولید شده در موتور خودروها را به محیط تخلیه کنند. امروزه راهکار مورد استفاده بازگرداندن این گازها به محفظه احتراق و سوزاندن آنها است. در این مورد نیز بنا به دلایلی که در بالا ذکر شد عدم توزیع یکنواخت و یکسان این گازها می‌تواند منجر به بالا رفتن آلایندگی و کاهش توان موتور گردد. مشخصات هندسی و موقعیت تزریق دود بازگردانده شده یا گازهای رخنه‌ای تاثیر بسزایی در توزیع یکنواخت آنها بین سیلندرها دارند. روش متعارف برای تعیین موقعیت مناسب تزریق این گازها در راهگاه ورودی هوا استفاده از روشهای عددی است که در آن نحوه پخش یک گونه گاز غیر از هوا (مثلا CO_2) در جریان هوای درون منیفولد ورودی برای یک سیکل کامل کاری موتور در شرایط مختلف مدل سازی و حل شود. به این ترتیب می‌توان میزان توزیع گونه دوم را در سیلندرهای مختلف به شکل کمی بررسی کرد. این کار باید برای شرایط کاری گوناگون و موقعیتهای مختلف تزریق انجام گیرد تا مناسبترین محل برای بازگردانی دود یا گازهای رخنه‌ای مشخص گردد. با توجه به این که زمان و هزینه مورد نیاز برای حل میدان جریان در هر حالت کاملا قابل ملاحظه است این روش بسیار وقت‌گیر و پر هزینه خواهد بود. در این تحقیق روش جدیدی بر اساس تعقیب ذرات (particle tracking) پیشنهاد شده است که علاوه بر دقت مناسب و قابلیت بررسی جامع‌تر (حالتهای ترکیبی) زمان مورد نیاز برای تعیین موقعیت مناسب را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. صحت کارکرد این روش به کمک آزمایش و بررسی‌های عددی به اثبات رسیده و به کمک آن بررسی جامعی بر روی عوامل موثر بر توزیع کنندگی گازهای تزریق شده به منیفولد ورودی صورت گرفته است

کلید واژه:

۱. بازگردانی محصولات احتراق
۲. گازهای رخنه‌ای
۳. توزیع سیلندر به سیلندر
۴. تعقیب ذرات
۵. منیفولد ورودی

امضای استاد راهنما:

تاریخ:

امضای استاد راهنما:

تاریخ

بسمه تعالی

Graduate Studies Thesis\Dissertation Information
Ferdowsi University of Mashhad

Title of Thesis\Dissertation: Experimental and Numerical Study of Effective Parameters on Location of Injecting Gases into the Intake Manifold

Author: Peyman Bashi Shahabi
Supervisor(s): Dr. Mohammad Reza Modarres Razavi and Dr. Hamid Niazmand
Advisor(s):

Faculty: Engineering	Department: *Mechanic*	Specialization:

Approval Date: 22/01/2011	Defense Date: 30/01/2011
M.S○ Ph.D. ●	Number of Pages:

Abstract:

Increase of environmental pollution and restricted emission legislations has forced companies to produce automobiles with the lower air pollutants. In this respect, discharge of blowby gases into the environment is prohibited earlier and recirculating the gases into the combustion chamber and burning them is used as the accepted solution. In addition, using EGR technique to control and reduce nitrogen oxides in internal combustion engines has been quite effective. An important common feature of these two methods is that if they have not employed correctly the increase of other pollutants and significant engine power reduction may occur which is mostly due to maldistribution of recirculated gases in the manifold. The existing experimental and numerical methods for evaluating the EGR/blowby maldistribution are based on the injection of air with different temperature or of different gas (mostly CO_2) from the main air stream. However, these methods are time consuming due to the large number of possible injection locations.

In this study, a new technique based on particle tracking is proposed to determine the cylinder-to-cylinder distribution of injected EGR/blowby gases into the intake manifold. The new method greatly reduces the time and effort to find the injection locations with the least maldistribution, especially when multiple injections are considered. The proposed method verified with numerical simulations and experimental examinations. In addition the method is utilized for a comprehensive study on effective parameters in EGR/blowby distribution into the intake manifold of EF7-TC engine.

Signature of Supervisor: Date: Signature of Supervisor: Date:	Key Words: 1. EGR 2. Blowby 3. Cylinder-to-Cylinder distribution 4. Particle tracking 5. Intake manifold

سپاسگزاری

به نام او و سپاس او را که بزرگترین حقیقت مسلم حیات و هستی و یگانه حجره علم و آگاهی است. در جریان مطالعات و تحقیقاتی که منجر به پیدایش این رساله گردید از دانش و راهنمایی استادان و محققین ارجمند و همکاری دوستان بزرگواری بهره‌جویی شده است و فراهم آمدن این وجیزه در حقیقت وامدار ایشان است نه من گرچه مسئولیت هرگونه لغزشی بر گردن من است لذا بر خود فرض می‌دانم از زحمات، عنایات و ارشادات بی‌دریغ آنان قدردانی نمایم.

از جناب آقای دکتر سید محمدرضا مدرس رضوی و دکتر حمید نیازمند که به عنوان اساتید راهنما در طول روزهای بسیار همواره با صبر و گشاده‌رویی اینجانب را در پیمودن مسیر پرپیچ و خم و ناهموار تحقیق راهنمایی کردند و خالصانه وقت گرانبها و اطلاعات مفید خود را در اختیارم قرار نهادند، سپاسگزارم. بدون شک انجام این پژوهش بدون راهنمودهای علمی، کمکهای فنی و همچنین پشتیبانی ایشان میسر و انجام پذیر نبود.

لازم می‌دانم از طرح تحقیقات اساسی و مطالعات کاربردی وزارت صنایع و معادن که با حمایت از این پایان‌نامه موجب تسهیل انجام امور و تامین منابع مالی این پژوهش شدند تشکر و قدردانی نمایم.

از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) نیز به علت در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی و اطلاعات فنی مورد نیاز این تحقیق کمال تشکر را دارم. از آقای مهندس ایزانلو که در طی مراحل آزمایشگاهی و همکاری با شرکت ایپکو از مشورتهای فنی و همایتهای بی‌دریغ ایشان برخوردار بوده‌ام، سپاسگزارم. همواره رویکرد مثبت و نگرش علمی عمیق ایشان به مسائل، گره‌گشای مشکلات فنی پیش روی تحقیق بود. همچنین از آقای مهندس کرباس فروشها که از مشورتهای علمی و فنی ایشان بهره بردم کمال تشکر را دارم. از پرسنل گروه کالیبراسیون، شبیه‌سازی و آزمایشگاه شرکت ایپکو که هر یک به سهم خود اینجانب را در انجام آزمایشگاها و فراهم نمودن بستر تست یاری نمودند قدردانی و تشکر می‌نمایم.

از دوست عزیزم جناب آقای مهندس علی مهریزی و سایر پرسنل محترم بخش رایانه دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی که همواره مشکلات سخت افزاری و نرم افزاری پیش روی این پژوهش را با بردباری و در کم‌ترین زمان ممکن مرتفع نمودند، سپاسگزارم.

و در پایان، بهترین سپاسها را تقدیم خانواده و بخصوص پدر و مادرم می‌کنم که با تحمل این بنده حقیر و مشکلاتی که خواسته و یا ناخواسته در طی زمان تحصیلم برایشان ایجاد نمودم با فراهم کردن آنچه در توان داشتند مرا در انجام هر چه بهتر این این تحقیق یاری و کمک نمودند. بدون شک بدون همراهی آنها انجام این کار غیر ممکن بود.

هرچه گویم عشق را شرح و بیان
چون به عشق آیم خجل باشم از آن
گر بگویم تا قیامت نعت او
هیچ آنرا غایت مقطع مجو

مثنوی معنوی- دفتر سوم

فهرست صفحه

فصل ۱ معرفی مبانی و تاریخچه ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ گازهای رخنه‌ای و سامانه PCV ۲

۱-۲-۱ آلاینده‌های محفظه میل لنگ ۲

۱-۲-۲ تهویه جذبی گازهای رخنه‌ای ۳

۱-۲-۳ تهویه غیر جذبی گازهای رخنه‌ای ۳

۱-۲-۴ سامانه تخلیه فشار مثبت گازهای رخنه‌ی محفظه میل لنگ ۳

۱-۳ بازگردانی دود (EGR) ۴

۱-۳-۱ انواع روشهای بازگردانی محصولات احتراق ۶

۱-۳-۲ بررسی عوامل موثر بر تشکیل اکسیدهای ازت ۷

۱-۳-۳ بررسی مزایا و معایب بازگردانی محصولات احتراق ۸

۱-۴ مروری بر تحقیقات انجام شده ۹

۱-۴-۱ گازهای رخنه‌ای ۹

۱-۴-۲ بازگردانی محصولات احتراق ۱۳

۱-۴-۳ توزیع مناسب محصولات احتراق بازگردانده شده به منیفولد ورودی ۱۷

فصل ۲ روشهای تعیین چگونگی توزیع دود یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده ۲۱

۲-۱ مقدمه ۲۱

۲-۲ روش تزریق گاز ۲۲

۲-۳ روش حرارتی ۲۲

۲-۴ روش تعقیب ذرات ۲۳

۲-۴-۱ محاسبات و نحوه تعقیب ذرات در میدان جریان سیال ۲۴

فصل ۳ تعریف مسئله و روشهای مورد استفاده ۲۶

۳-۱ مقدمه ۲۶

۳-۲ هندسه و مشخصات موتور مورد مطالعه ۲۹

۳-۳ روش عددی ۳۰

۳-۳-۱ معادلات حاکم ۳۰

۳-۳-۲ شرایط مرزی ۳۱

۳-۳-۳ استقلال نتایج از شبکه‌بندی ۳۳

۳-۳-۴ اعتبار سنجی روش عددی ۳۴

۳-۴ روش آزمایشگاهی ۴۱

۳-۴-۱ تجهیزات و بستر آزمایش ۴۱

۳-۴-۲ مراحل و نحوه انجام آزمایش ۴۸

۳-۴-۳ محاسبات مورد نیاز ۵۰

فصل ۴ نتایج آزمایشگاهی، صحت روش تعقیب ذرات و عوامل موثر بر عملکرد آن ۵۸

۴-۱ مقدمه ۵۸

۴-۲ نتایج آزمایشگاهی ۵۹

۴-۲-۱ نتایج نقطه تزریق ۱ ۶۰

۴-۲-۲ نتایج نقطه تزریق ۲ ۶۳

۴-۲-۳ نتایج نقطه تزریق ۳ ۶۶

۴-۲-۴ نتایج نقطه تزریق ۴ ۶۹

۴-۳ بررسی صحت روش تعقیب ذرات و مقایسه نتایج ۷۲

۴-۴ عوامل موثر بر نتایج روش تعقیب ذرات ۸۰

۴-۴-۱ اثر تعداد ذرات تزریق شده ۸۰

۴-۴-۲ اثر جریان جرم گاز تزریق شده ۸۲

۴-۴-۳ اثر پخش ۸۴

فصل ۵ نتایج عددی و بررسی عوامل موثر بر توزیع گازهای تزریق شده ۸۶

۵-۱ مقدمه ۸۶

۵-۲ معیارهایی برای تعیین یکنواختی توزیع گازهای تزریق شده ۸۷

۵-۳ مطالعه عددی عوامل موثر بر توزیع گازهای تزریق شده ۸۹

۵-۳-۱ اثر زاویه تزریق ۹۲

۵-۳-۲ اثر سرعت تزریق ۹۵

۵-۳-۳ اثر دور موتور ۹۸

۵-۴ نتایج حاصل از ترکیب دو نقطه تزریق ۱۰۰

۵-۵ مطالعه تزریق در ورودی جریان ۱۰۶

فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۹

۶-۱ نتیجه گیری ۱۰۹

۶-۲ پیشنهادات برای ادامه کار ۱۱۱

مراجع ۱۱۳

مراجع فارسی ۱۱۳

مراجع لاتین ۱۱۴

ضمائم

ضمیمه الف ۱۲۲

ضمیمه ب ۱۳۳

فهرست شکلها صفحه

شکل ۱-۱ شماتیک سیستم و دستگاه اندازه‌گیری تمرکز CO2 در راهگاه منیفولد در تحقیق گرین [Green, R. M., 2000] ۱۸

شکل ۱-۲ راهگاه‌های مکش و منیفولد اولیه موتور مورد بررسی در تحقیق سیورت و همکاران [Siewert, R. M. et al., 2001] ۱۹

شکل ۳-۱ منیفولد ورودی موتور EF7-TC: (الف) نمای بیرونی (ب) نمای داخلی ۳۰

شکل ۳-۲ مقادیر دبی جرمی در ورودی و فشار درچهار راهگاه خروجی منیفولد برای یک سیکل کاری موتور EF7 در حالت تمام بار در دورهای (الف) ۲۰۰۰، (ب) ۳۰۰۰ و (ج) ۴۰۰۰ rpm ۳۲

شکل ۳-۳ شبکه بندی منیفولد ورودی EF7-TC : (الف) شامل ۷۳,۱۴۰ سلول (ب) شامل ۱۴۸,۰۵۶ سلول ۳۳

شکل ۳-۴ تغییرات دبی جرمی هوا بر حسب زاویه میل‌لنگ در یک سیکل کاری موتور در دور موتور ۲۰۰۰ rpm در راهگاههای: (الف) اول (ب) دوم (ج) سوم (د) چهارم ۳۵

شکل ۳-۵ تغییرات دبی جرمی هوا بر حسب زاویه میل‌لنگ در یک سیکل کاری موتور در دور موتور ۳۰۰۰ rpm در راهگاههای: (الف) اول (ب) دوم (ج) سوم (د) چهارم ۳۷

شکل ۳-۶ تغییرات دبی جرمی هوا بر حسب زاویه میل‌لنگ در یک سیکل کاری موتور در دور موتور ۴۰۰۰ rpm در راهگاههای: (الف) اول (ب) دوم (ج) سوم (د) چهارم ۳۸

شکل ۳-۷ موقعیت تزریق در نظر گرفته شده بر روی منیفولد وردی موتور EF7-TC برای بررسی صحت روش تعقیب ذرات ۳۹

شکل ۳-۸ نحوه توزیع CO2 تزریق شده بین راهگاههای منیفولد ورودی سهم هر یک از آنها ۴۰

شکل ۳-۹ نمای کلی از تجهیزات نصب شده بر روی بستر آزمایش موتور EF7-TC ۴۱

شکل ۳-۱۰ دینامومتر ۱۹۰ kW ادی کارنت متصل به موتور EF7-TC ۴۲

شکل ۳-۱۱ نمایی از کنترل کننده دریچه تراتل ۴۲

شکل ۳-۱۲ دستگاه سوخت سنج بستر آزمایش برای سنجش مصرف بنزین ۴۳

شکل ۳-۱۳ دستگاه سنجش دبی گازهای رخنه‌ای ۴۳

شکل ۳-۱۴ نمونه ترموکوپلهای نوع K ۴۴

شکل ۳-۱۵ محل نصب ترموکوپلها بر روی منیفولد خروجی موتورEF7-TC ۴۴

شکل ۳-۱۶ نمونه λ سنسور نصب شد بر روی بستر آزمایش از دو نمای کلی و نزدیک ۴۵

شکل ۳-۱۷ دستگاه نمایش دهنده مقادیر λ ۴۵

شکل ۳-۱۸ محل نصب λ سنسورها بر روی منیفولد خروجی ۴۶

شکل ۳-۱۹ مجموعه شبیه‌ساز تزیق گاز شامل کپسول گاز، رگلاتور، شیر کنترل دبی و فشار سنج ۴۷

شکل ۳-۲۰ شیر کنترل دبی مورد استفاده برای تنظیم دبی گاز مایع تزریق شده به منیفولد ورودی ۴۷

شکل ۳-۲۱ نمایی از رک و اتاق کنترل ۴۷

شکل ۳-۲۲ طرحواره چیدمان تجهیزات نصب شده بر روی بستر تست موتور EF7-TC برای تعیین چگونگی توزیع گازهای تزریقی به منیفولد ورودی ۴۹

شکل ۴-۱ چهار موقعیت در نظر گرفته شده بر روی محفظه آرامش منیفولد ورودی موتور EF7-TC برای تزریق گاز ۵۹

شکل ۴-۲ چهار موقعیت در نظر گرفته شده بر روی محفظه آرامش منیفولد ورودی موتور EF7-TC برای تزریق گاز ۷۲

شکل ۴-۳ مقایسه توزیع گاز تزریق شده از نقطه تزریق ۱ در بین راهگاهها برای سه روش عددی، تحلیل λ و تحلیل دما در دور موتور rpm ۳۰۰۰: (الف) نرخ تزریق ۰/۵٪ (ب) نرخ تزریق ۱/۰٪ ۷۳

شکل ۴-۴ مقایسه توزیع گاز تزریق شده از نقطه تزریق ۱ در بین راهگاهها برای سه روش عددی، تحلیل λ و تحلیل دما در دور موتور rpm ۴۰۰۰: (الف) نرخ تزریق ۰/۵٪ (ب) نرخ تزریق ۱/۰٪ ۷۴

شکل ۴-۵ مقایسه توزیع گاز تزریق شده از نقطه تزریق ۲ در بین راهگاهها برای سه روش عددی، تحلیل λ و تحلیل دما در دور موتور rpm ۳۰۰۰: (الف) نرخ تزریق ۰/۵٪ (ب) نرخ تزریق ۱/۰٪ ۷۵

شکل ۴-۶ مقایسه توزیع گاز تزریق شده از نقطه تزریق ۲ در بین راهگاهها برای سه روش عددی، تحلیل λ و تحلیل دما در دور موتور rpm ۴۰۰۰: (الف) نرخ تزریق ۰/۵٪ (ب) نرخ تزریق ۱/۰٪ ۷۶

شکل ۴-۷ مقایسه توزیع گاز تزریق شده از نقطه تزریق ۳ در بین راهگاهها برای سه روش عددی، تحلیل λ و تحلیل دما در دور موتور rpm ۳۰۰۰: (الف) نرخ تزریق ۰/۵٪ (ب) نرخ تزریق ۱/۰٪ ۷۷

شکل ۴-۸ مقایسه توزیع گاز تزریق شده از نقطه تزریق ۳ در بین راهگاهها برای سه روش عددی، تحلیل λ و تحلیل دما در دور موتور rpm ۴۰۰۰: (الف) نرخ تزریق ۰/۵٪ (ب) نرخ تزریق ۱/۰٪ ۷۸

شکل ۴-۹ مقایسه توزیع گاز تزریق شده از نقطه تزریق ۴ در بین راهگاهها برای سه روش عددی، تحلیل λ و تحلیل دما در دور موتور rpm ۳۰۰۰: (الف) نرخ تزریق ۰/۵٪ (ب) نرخ تزریق ۱/۰٪ ۷۸

شکل ۴-۱۰ مقایسه توزیع گاز تزریق شده از نقطه تزریق ۴ در بین راهگاهها برای سه روش عددی، تحلیل λ و تحلیل دما در دور موتور rpm ۴۰۰۰: (الف) نرخ تزریق ۰/۵٪ (ب) نرخ تزریق ۱/۰٪ ۷۹

شکل ۴-۱۱ شبکه‌بندی اطراف نقطه تزریق ۱ و تعداد سلولهای روی سطح آن : (الف) ۲۰ سلول (ب) ۱۰۷ سلول ۸۱

شکل ۵-۱ موقعیتهای در نظر گرفته شده (۳۹ نقطه تزریق) بر روی محفظه آرامش منیفولد ورودی EF7-TC برای تزریق محصولات احتراق یا گازهای رخنه‌ای بازگردانده شده: (الف) نمای جلو (ب) نمای پشت ۹۰

شکل ۵-۲ طرحواره زوایای مختلف تزریق در مقایسه با حالت پایه و نحوه شماره گذاری آنها ۹۳

شکل ۵-۳ توزیع نرمال شده گازهای (ذرات) تزریق شده از نقطه تزریق ۳۴ برای زاویه تزریق پایه و چهار زاویه دیگر بر حسب درصد ۹۴

شکل ۵-۴ دبی جرمی محصولات احتراق بازگردانده شده یا گاز رخنه‌ای تزریق شده به منیفولد ورودی در یک سیکل کاری موتور برای تزریق ترکیبی از نقاط ۶ و ۲۸ ..... ۱۰۳

شکل ۵-۵ پنج نقطه تزریق در نظر گرفته شده در ورودی منیفولد موتور EF7-TC ۱۰۶

شکل ب-۱ تجهیزات لازم برای اندازه‌گیری به روش PLIF ۱۳۵

فهرست جدولها صفحه

جدول ۳-۱ مشخصات موتور EF7-TC ۲۹

جدول ۳-۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی سه بعدی, مدل یک بعدی و آزمایشگاهی جریان جرم در منیفولد ورودی برای دور موتور ۲۰۰۰ rpm ۳۶

جدول ۳-۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی سه بعدی, مدل یک بعدی و آزمایشگاهی جریان جرم در منیفولد ورودی برای دور موتور ۳۰۰۰ rpm ۳۷

جدول ۳-۴ مقایسه نتایج شبیه‌سازی سه بعدی, مدل یک بعدی و آزمایشگاهی جریان جرم در منیفولد ورودی برای دور موتور ۴۰۰۰ rpm ۳۹

جدول ۳-۵ مقایسه نتایج دو روش تزریق CO2 و تعقیب ذرات در دور موتور ۳۰۰۰ rpm ۴۰

جدول ۳-۶ مشخصات و دقت برخی از تجهیزات آزمایشگاهی بستر آزمایش ۴۳

جدول ۳-۷ مشخصات سوخت مورد استفاده در آزمایش ۵۲

جدول ۴-۱ مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ مصرف سوخت و λ برای حالت پایه در دورهای موتور ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ rpm (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۶۰

جدول ۴-۲ دمای محصولات احتراق برای حالت پایه در دورهای موتور ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ rpm (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۶۰

جدول ۴-۳ مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ مصرف سوخت و λ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ rpm برای تزریق گاز با نرخ ۰/۵ و ۱٪ از نقطه تزریق ۱ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری) ۶۱

جدول ۴-۴ نتایج توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها از تحلیل λ برای نقطه تزریق ۱ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ rpm ۶۱

جدول ۴-۵ دمای محصولات احتراق برای تزریق گاز از نقطه تزریق ۱ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۶۲

جدول ۴-۶ دمای محصولات احتراق برای تزریق گاز از نقطه تزریق ۱ در دور موتور ۴۰۰۰ rpm (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۶۲

جدول ۴-۷ نتایج توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها از تحلیل دمای محصولات احتراق برای نقطه تزریق ۱ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ rpm ۶۳

جدول ۴-۸ مقادیر انـــــدازه‌گیری شده نرخ مـــصرف سوخت و λ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و rpm ۴۰۰۰ برای تزریق گاز با نرخ ۰/۵ و ۱٪ از نقطه تزریق ۲ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری) ۶۳

جدول ۴-۹ نتایج توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها از تحلیل λ برای نقطه تزریق ۲ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و rpm ۴۰۰۰ ..... ۶۴

جدول ۴-۱۰ دمای محـصولات احتراق برای تزریق گاز از نقطه تزریق ۲ در دور موتور rpm ۳۰۰۰ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۶۵

جدول ۴-۱۱ دمای محصولات احتراق برای تزریق گاز از نقطه تزریق ۲ در دور موتور rpm ۴۰۰۰ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۶۵

جدول ۴-۱۲ نتایج توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها از تحلیل دمای محصولات احتراق برای نقطه تزریق ۲ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و rpm ۴۰۰۰ ..... ۶۶

جدول ۴-۱۳ مقادیر انـــــدازه‌گیری شده نرخ مـــصرف سوخت و λ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و rpm ۴۰۰۰ برای تزریق گاز با نرخ ۰/۵ و ۱٪ از نقطه تزریق ۳ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری) ۶۶

جدول ۴-۱۴ نتایج توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها از تحلیل λ برای نقطه تزریق ۳ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و rpm ۴۰۰۰ ..... ۶۷

جدول ۴-۱۵ دمای محصولات احتراق برای تزریق گاز از نقطه تزریق ۳ در دور موتور rpm ۳۰۰۰ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۶۸

جدول ۴-۱۶ دمای محـصولات احتراق برای تزریق گاز از نقطه تزریق ۳ در دور موتور rpm ۴۰۰۰ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۶۸

جدول ۴-۱۷ نتایج توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها از تحلیل دمای محصولات احتراق برای نقطه تزریق ۳ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و rpm ۴۰۰۰ ..... ۶۹

جدول ۴-۱۸ مقادیر انـــــدازه‌گیری شده نرخ مـــصرف سوخت و λ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و rpm ۴۰۰۰ برای تزریق گاز با نرخ ۰/۵ و ۱٪ از نقطه تزریق ۴ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری) ۶۹

جدول ۴-۱۹ نتایج توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها از تحلیل λ برای نقطه تزریق ۴ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و rpm ۴۰۰۰ ..... ۷۰

جدول ۴-۲۰ دمای محصولات احتراق برای تزریق گاز از نقطه تزریق ۴ در دور موتور rpm ۳۰۰۰ (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۷۰

جدول ۴-۲۱ دمای محصولات احتراق برای تزریق گاز از نقطه تزریق ۴ در دور موتور ۴۰۰۰ rpm (با قطعیت ۹۹٪ و تعداد ۱۰ نمونه اندازه‌گیری شده) ۷۱

جدول ۴-۲۲ نتایج توزیع گاز تزریق شده بین سیلندرها از تحلیل دمای محصولات احتراق برای نقطه تزریق ۴ در دورهای موتور ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ rpm ۷۱

جدول ۴-۲۳ نتایج اثر تعداد ذرات تزریق شده برای نقطه تزریق ۱ ..... ۸۲

جدول ۴-۲۴ توزیع ذرات تزریق شده از نقطه تزریق ۳۴ با در نظر گرفتن جریانهای جرم ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴٪ و ۵٪ ۸۳

جدول ۴-۲۵ توزیع ذرات تزریق شده از نقطه تزریق ۳۴ همراه با تزریق ۱٪ هوا و CO2 ..... ۸۵

جدول ۵-۱ نقاط تزریق دارای یکنواختی توزیع بیش از ۸۵٪ برای شرایط مربوط به حالت تزریق پایه ۹۶

جدول ۵-۲ نقاط تزریق دارای یکنواختی توزیع بیش از ۸۵٪ برای سرعت تزریق ۱/۵ برابر سرعت پایه ۹۷

جدول ۵-۳ نقاط تزریق دارای یکنواختی توزیع بیش از ۸۵٪ برای سرعت تزریق ۳ برابر سرعت پایه ۹۸

جدول ۵-۴ نقاط تزریق دارای یکنواختی توزیع بیش از ۸۵٪ برای دور موتور ۲۰۰۰ rpm ۹۹

جدول ۵-۵ نقاط تزریق دارای یکنواختی توزیع بیش از ۸۵٪ برای دور موتور ۴۰۰۰ rpm ۹۹

جدول ۵-۶ متوسط یکنواختی توزیع گاز چهار نقطه تزریق مشترک در سه دور موتور مورد مطالعه که یکنواختی توزیع بیش از ۸۵٪ را دار هستند ۱۰۰

جدول ۵-۷ ترکیب دوتایی نقاط تزریق دارای یکنواختی توزیع بیش از ۹۶/۵٪ در دور موتور ۳۰۰۰ rpm ۱۰۲

جدول ۵-۸ مقایسه نتایج روش تعقیب ذرات و تزریق CO2 برای تزریق ترکیبی از دو نقطه تزریق ۶ و ۲۸ ..... ۱۰۳

جدول ۵-۹ ترکیب دوتایی نقاط تزریق دارای یکنواختی توزیع بیش از ۹۶/۵٪ در دور موتور ۲۰۰۰ rpm ۱۰۴

جدول ۵-۱۰ ترکیب دوتایی نقاط تزریق دارای یکنواختی توزیع بیش از ۹۶/۵٪ در دور موتور ۴۰۰۰ rpm ۱۰۵

جدول ۵-۱۱ تـوزیع مـربوط به نقاط تزریق مقطـع ورودی منیفولد هوا در دور موتور rpm ۲۰۰۰ ..... ۱۰۷

جدول ۵-۱۲ تـوزیع مـربوط به نقاط تزریق مقطـع ورودی منیفولد هوا در دور موتور rpm ۳۰۰۰ ..... ۱۰۷

جدول ۵-۱۳ تـوزیع مـربوط به نقاط تزریق مقطـع ورودی منیفولد هوا در دور موتور rpm ۴۰۰۰ ..... ۱۰۸

فهرست نمادها

A	ضریب ثابت معادله تخمین سهم هر سیلندر از کل سوخت تزریق شده در تحلیل حرارتی
B	ضریب ثابت معادله تخمین سهم هر سیلندر از کل سوخت تزریق شده در تحلیل حرارتی
C_p	گرمای ویژه فشار ثابت (J/kg.K)
k	انرژی جنبشی آشفتگی (m2/s2)
$\dot{m}_{air}$	دبی جرمی هوا (kg/s)
$\dot{m}_{LPG}$	دبی جرمی سوخت گاز مایع (kg/s)
$\dot{m}_{fuel}$	دبی جرمی سوخت (kg/s)
N	تعداد سیلندر موتور
P	فشار (N/m2)
T	دما در معادله انرژی یا دمای محصولات احتراق (K)
u	مولفه بردار سرعت در راستای x
v	مولفه بردار سرعت در راستای y
$\vec{V}$	بردار سرعت
w	مولفه بردار سرعت در راستای z

نمادهای یونانی

ε	تلفات انرژی جنبشی آشفتگی (m2/s3)
λ	نسبت هوا به سوخت واقعی به نسبت هوا به سوخت استوکیومتریک
μ	لزجت دینامیکی (N s/m2)
μ_t	لزجت آشفتگی
ρ	چگالی (kg/m3)
$\vec{\tau}$	تنسور تنش

زیر نویسها

$_{actual}$	مقادیر مربوط به شرایط کارکرد واقعی (غیر استوکیومتریک)
$_B$	مقادیر مربوط به حالت پایه که در آن گاز LPG به منیفولد ورودی تزریق نمی‌شود
$_I$	مقادیر مربوط به حالت همراه با تزریق گاز LPG