دانشکده مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

بررسی جریان ورودی به سیلندر در موتورهای احتراق داخلی با استفاده از مدل توربولانسی گردابه بزرگ

نگارنده:

محمد خرم‌دل

استاد راهنما:

دکتر حسن خالقی

زمستان 1393

بسم الله الرحمن الرحیم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای محمد خرم دل پایان نامه ٦ واحدی خود را با عنوان بررسی جریان ورودی به سیلندر در موتورهای احتراق داخلی با استفاده از مدل توربولانسی گردابه بزرگ (LES) در تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۱۵ 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 - تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر حسن خلقی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر قاسم حیدری نژاد	استاد	
استاد ناظر	دکتر مسعود میرزایی	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر قاسم حیدری نژاد	استاد	

دانشکده مهندسی مکانیک

« 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 پایان نامه/ 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 دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه 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، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) 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 آئین نامه های 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.

« اینجانب ...محمد مرادی.... دانشجوی دوره ☑ روزانه ☐ شبانه ☐ نیمه حضوری ☐ پردیس ☑ کارشناسی‌ارشد ☐ دکتری رشته مهندسی مکانیک گرایش ...تبدیل انرژی... ورودی سال ۱۳۹۱ متعهد می‌شوم کلیه نکات مندرج در آیین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

نام و نام خانوادگی

امضا

تاریخ ۱۳۹۲/۴/۳

دانشکده مهندسی مکانیک

«آیین نامه چاپ پایان‌نامه رساله‌های دانشجویان دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس»

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

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:
«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه ☑ کارشناسی‌ارشد ☐ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی است که در سال ۱۳۹۳ در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/ جناب آقای دکتر محمود هاتفی ، مشاوره سرکار خانم/ جناب آقای دکتر ——— و مشاوره سرکار خانم/ جناب آقای دکتر ——— دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

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

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند 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 مسلوب 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 خرمدل دانشجوی دوره ☑ روزانه ☐ شبانه ☐ نیمه حضوری ☐ پردیس ☑ کارشناسی‌ارشد ☐ دکتری رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم

نام و نام خانوادگی
امضا
تاریخ

۹۳/۴/۳

تقدیم به پدر دلسوزم

کوهی استوار و حامی من در کل زندگی؛

و تقدیم به مادر مهربانم

سنگ صبوری که الفبای زندگی به من آموخت؛

تشکر و قدردانی

امتنان و سپاس از استاد ارجمند و فرهیخته، جناب آقای دکتر حسن خالقی، که در طول دوره تحصیل و انجام این پایان‌نامه با همیّت و جدّیت بنده را به اندیشه و تفکّرِ صحیح در این مسیر پر پیچ و خم رهنمون شدند و با صبر بر مسائل و مشکلات پیش‌آمده و ایراد راهنمایی‌های ارزشمند و بی‌شائبه خود، چه از لحاظ علمی و اخلاقی، درس‌هایی از زندگی را به بنده آموختند. بر آستان آفریدگار شاکرم که افتخار شاگردی ایشان را نصیب بنده نمود.

از زحمات بی‌دریغ و بی‌شائبه پدر و مادر عزیزم، که در تمام مراحل زندگی مشوق و پشتیبان بنده بوده‌اند، مرا تعلیم دادند و تربیت کردند تا به این مرحله از زندگی برسم کمال تشکر را به عمل می‌آورم و همیشه دست‌بوس آن‌ها هستم.

از تمامی دوستان عزیز و هم‌قطاران ارجمندم در آزمایشگاه دینامیک سیالات محاسباتی به جهت راهنمایی‌ها، همفکری‌ها و بحث‌های علمی دقیقشان، که با جان و دل بنده را در این دوره یاری کردند و همچنین از سایر همکلاسی‌های گرامی نیز که با نکته‌سنجی‌های مشفقانه خود اینجانب را در طول دوره تحصیل و انجام این پایان‌نامه یاری رساندند صمیمانه تشکر می‌گردد.

چکیده

در ایـن پـژوهش جریـان ورودی بـه سـیلندر در موتورهـای احتـراق داخلـی در مرحلـه مکـش و تـراکم شبیه‌سازی‌شده است. برای شبیه‌سازی اغتشاش ایجادشده درون سیلندر، یک کد عددی مربوط بـه مـدل شبیه‌سازی گردابه بزرگ با مدل زیر شبکه اسماگورینسکی توسعه‌یافته است. موتـور شـبیه‌سـازی‌شـده در این پژوهش، موتور آزمایشگاهی متقارن کالج امپریال لندن می‌باشد که دارای هندسه سـیلندر و پیسـتون تخت و همچنین سوپاپ ثابت است. در بخش ابتدایی نتایج، مقایسه‌ای بین دو مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه بزرگ و کی اپسیلون صورت گرفته است که نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهد مدل شبیه‌سـازی گردابـه بزرگ، نتایج مربوط به جریان مغشوش درون سیلندر را با دقت بیشتری نسبت به مدل کی اپسیلون ارائـه می‌دهد که ازجمله آن‌ها می‌توان به سرعت مربع میانگین ریشه که نشان‌دهنـده سـطح نوسـانات سـرعت است اشاره کرد. همچنین روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ جزئیات بیشتری نسبت به مدل کی اپسـیلون در ساختار جریان درون سیلندر نشان می‌دهد. در بخش دوم نتایج شبیه‌سازی مربوط به موتور کالج امپریـال لندن، سوپاپ متحرک در نظر گرفته‌شده و برای بررسی تـأثیر هندسـه سـیلندر و پیسـتون بـر روی نـرخ گردش جریان، بر روی سرسیلندر و پیستون کاسـه‌ای اسـتوانه‌ای و متقـارن لحـاظ شـده اسـت. جریـان ایجادشده در لبه تیز کاسه‌ها باعث افزایش نرخ گردش جریان در این نواحی می‌شود. به‌نحوی‌که در زاویـه 15 درجه میل‌لنگ قبل از نقطه مرگ بالا و در نزدیکـی مرحلـه پاشـش سـوخت، در مقایسـه بـا هندسـه سیلندر و پیستون تخت، نرخ گردش جریان با افزودن کاسه سرسیلندر 7/3 درصد، کاسـه پیسـتون 18/5 درصد و کاسه سرسیلندر و کاسه پیستون به‌صورت همزمان 37 درصـد افـزایش مـی‌یابـد. همچنـین نـرخ گردش جریان ایجادشده درون سیلندر به ابعاد کاسه در نظر گرفته‌شده بر روی پیستون حساس می‌باشـد. بطوریکه که با افزایش شعاع کاسه پیستون، نرخ گردش جریان یک‌روند صعودی-نزولی را در پیش داشـته و دارای یک حد بیشینه می‌باشد. از طرفی با افزایش عمق کاسه پیستون نرخ گردش جریان کـاهش مـی-یابد.

کلیدواژه : موتورهای احتراق داخلی، جریان ورودی به سـیلندر، شـبیه‌سـازی گردابـه بـزرگ، دینامیـک سیالات محاسباتی.

فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها ..... ج
فهرست جدول‌ها ..... ح
فهرست علائم و نشانه‌ها ..... ط

فصل 1: مقدمه
1-1- پیشگفتار 1
2-1- جریان ورودی به سیلندر 2
3-1- مرور پژوهش های پیشین 5
4-1- اهداف پژوهش حاضر 10

فصل 2: معادلات حاکم بر جریان و شرایط مرزی مسئله
1-2- مقدمه 11
2-2- معادلات حاکم بر جریان 13
1-2-2- فرم لحظه ای معادلات 13
2-2-2- فرم فیلترگیری شده معادلات 14
3-2-2- مدل کردن مقیاس زیرشبکه 17
1-3-2-2- مدل زیرشبکه اسماگورینسکی 18
3-2- معادله عمومی انتقال 20
4-2- دستگاه مختصات درون سیلندر 21
2-4-2- معادله کلی انتقال در ناحیه انبساطی- انقباضی 22
3-4-2- معادله کلی انتقال در ناحیه انتقالی 23
5-2- شرایط مرزی مسئله 25
1-5-2- شرط مرزی دیواره ها 25
2-5-2- شرط مرزی دهانه سوپاپ 29
3-5-2- شرط مرزی محور تقارن 32

فصل 3: روش حل معادلات حاکم بر مسئله
1-3- مقدمه 33
2-3- گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان 34
2-2-3- گسسته سازی معادله کلی انتقال 35
3-2-3- تقریب جملات چشمه 41
3-3- الگوریتم پیزو 44
4-3- مراحل حل معادلات 44
1-4-3- حل معادلات مومنتوم 45

3-4-2- حل معادله انرژی 45
3-5- مراحل تصحیح معادلات 46
3-5-1- اولین مرحله تصحیح معادله مومنتوم 46
3-5-2- دومین مرحله تصحیح معادله مومنتوم 48
3-6- محاسبات مربوط به جریان سوپاپ و تنظیم حجمی 50

فصل 4: نتایج حاصل از شبیه سازی
4-1- مقدمه 53
4-2- پیکربندی هندسی و شرایط عملکردی موتور 53
4-2-2- شرایط اولیه و شرایط مرزی 55
4-3- بررسی اثر اندازه شبکه و گام زمانی محاسباتی 55
4-3-1- شبکه محاسباتی 55
4-3-2- دقت شبکه محاسباتی 56
4-3-3- بررسی اثر گام زمانی محاسباتی 60
4-4- بررسی اثر شبیه سازی چند سیکلی 61
4-5- صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی 62
4-6- بررسی اثر ضریب تطبیقی اسماگورینسکی 69
4-7- مقایسه نتایج شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون 70
4-8- بررسی اثر هندسه سیلندر و پیستون 78
4-8-1- اثر هندسه سیلندر و پیستون بر نرخ گردش جریان 80
4-8-2- اثر هندسه سیلندر و پیستون بر انرژی جنبشی اغتشاشی 88
4-8-3- بررسی تأثیر اندازه شعاع و عمق کاسه پیستون بر نرخ گردش جریان 90

فصل 5: جمع بندی نتایج و پیشنهادها
5-1- جمع بندی نتایج 93
5-2- پیشنهاد برای ادامه کار 95

مراجع **96**

فهرست شکل‌ها

شکل (2-1) فضای داخلی سیلندر و شبکه محاسباتی (ناحیه انتقالی و انبساطی- انقباضی)..... 22
شکل (2-2) شماتیک حجم کنترل مجاور با دیواره شمالی سیلندر..... 28
شکل (3-1) حجمهای کنترلی مورد استفاده برای کمیت های اسکالر و مؤلفه‌های سرعت 34
شکل (3-2) حجم کنترل نمونه برای محاسبات مربوط به سرعت محوری..... 38
شکل (3-3) حجم کنترل نمونه برای محاسبات مربوط به سرعت شعاعی..... 40
شکل (4-1) طرح کلی مونتاژ سیلندر-پیستون متقارن کالج امپریال لندن 54
شکل (4-2) شبکه محاسباتی دوبعدی ایجادشده درون مونتاژ سیلندر-پیستون در راستای طول و شعاع سیلندر..... 56
شکل (4-3) کانتور شاخص کیفیت شبیه سازی گردابه بزرگ در زاویه 75 درجه میل‌لنگ برای شبکه ای با 2025 گره محاسباتی..... 58
شکل (4-4) کانتور شاخص کیفیت شبیه سازی گردابه بزرگ در زاویه 75 درجه میل‌لنگ برای شبکه ای با 5400 گره محاسباتی..... 58
شکل (4-5) کانتور شاخص کیفیت شبیه سازی گردابه بزرگ در زاویه 75 درجه میل‌لنگ برای شبکه ای با 8100 گره محاسباتی..... 59
شکل (4-6) کانتور شاخص کیفیت شبیه سازی گردابه بزرگ در زاویه 180 درجه میل‌لنگ برای شبکه ای با 5400 گره محاسباتی..... 59
شکل (4-7) تأثیر گامهای مختلف درجه دوران میل لنگ بر پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 36 درجه میل لنگ و در فاصله 10 میلی متری از سرسیلندر 60
شکل (4-8) تأثیر گامهای مختلف درجه دوران میل لنگ بر پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 36 درجه میل لنگ و در فاصله 20 میلی متری از سرسیلندر..... 60
شکل (4-9) تأثیر تعداد سیکل های شبیه سازی بر پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 90 درجه میل لنگ و در فاصله 30 میلی متری از سرسیلندر..... 62
شکل (4-10) تأثیر تعداد سیکل های شبیه سازی بر پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 144 درجه میل لنگ و در فاصله 30 میلی متری از سرسیلندر..... 62
شکل (4-11) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 36 درجه میل لنگ و در فاصله 10 میلی متری از سرسیلندر 63
شکل (4-12) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 36 درجه میل لنگ و در فاصله 20 میلی متری از سرسیلندر 63

شکل (4-13) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 36 درجه میل لنگ و در فاصله 30 میلی متری از سرسیلندر 64
شکل (4-14) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 90 درجه میل لنگ و در فاصله 10 میلی متری از سرسیلندر 64
شکل (4-15) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 90 درجه میل لنگ و در فاصله 20 میلی متری از سرسیلندر 64
شکل (4-16) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 90 درجه میل لنگ و در فاصله 50 میلی متری از سرسیلندر 65
شکل (4-17) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 144 درجه میل لنگ و در فاصله 10 میلی متری از سرسیلندر 65
شکل (4-18) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 144 درجه میل لنگ و در فاصله20 میلی متری از سرسیلندر 65
شکل (4-19) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 144 درجه میل لنگ و در فاصله 30 میلی متری از سرسیلندر 66
شکل (4-20) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 270 درجه میل لنگ و در فاصله 10 میلی متری از سرسیلندر 66
شکل (4-21) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 270 درجه میل لنگ و در فاصله 20 میلی متری از سرسیلندر 66
شکل (4-22) پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 270 درجه میل لنگ و در فاصله 50 میلی متری از سرسیلندر 67
شکل (4-23) پروفیل سرعت مربع میانگین ریشه محوری در زاویه 36 درجه میل لنگ و در فاصله 10 میلی متری از سرسیلندر 68
شکل (4-24) پروفیل سرعت مربع میانگین ریشه محوری در زاویه 36 درجه میل لنگ و در فاصله 20 میلی متری از سرسیلندر 68
شکل (4-25) پروفیل سرعت مربع میانگین ریشه محوری در زاویه 144 درجه میل لنگ و در فاصله 10 میلی متری از سرسیلندر 69
شکل (4-26) پروفیل سرعت مربع میانگین ریشه محوری در زاویه 144 درجه میل لنگ و در فاصله 20 میلی متری از سرسیلندر 69
شکل (4-27) بررسی اثر ضریب تطبیقی اسماگورینسکی بر پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 90 درجه میل لنگ و در فاصله 30 میلی متری از سرسیلندر 70
شکل (4-28) بررسی اثر ضریب تطبیقی اسماگورینسکی بر پروفیل سرعت متوسط محوری در زاویه 144 درجه میل لنگ و در فاصله 20 میلی متری از سرسیلندر 70

شکل (4-29) مقایسه پروفیل سرعت متوسط محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 36 درجه میل‌لنگ و در فاصله 10 میلی متری از سرسیلندر 72
شکل (4-30) مقایسه پروفیل سرعت متوسط محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 36 درجه میل‌لنگ و در فاصله 20 میلی متری از سرسیلندر 72
شکل (4-31) مقایسه پروفیل سرعت متوسط محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 36 درجه میل‌لنگ و در فاصله 30 میلی متری از سرسیلندر 72
شکل (4-32) مقایسه پروفیل سرعت متوسط محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 144 درجه میل‌لنگ و در فاصله 10 میلی متری از سرسیلندر 72
شکل (4-33) مقایسه پروفیل سرعت متوسط محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 144 درجه میل‌لنگ و در فاصله 20 میلی متری از سرسیلندر 73
شکل (4-34) مقایسه پروفیل سرعت متوسط محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 144 درجه میل‌لنگ و در فاصله 30 میلی متری از سرسیلندر 73
شکل (4-35) مقایسه پروفیل سرعت مربع میانگین ریشه محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 36 درجه میل‌لنگ و در فاصله 10 میلی‌متری از سرسیلندر 74
شکل (4-36) مقایسه پروفیل سرعت مربع میانگین ریشه محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 36 درجه میل‌لنگ و در فاصله 20 میلی‌متری از سرسیلندر 74
شکل (4-37) مقایسه پروفیل سرعت مربع میانگین ریشه محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 144درجه میل‌لنگ و در فاصله 10 میلی‌متری از سرسیلندر 74
شکل (4-38) مقایسه پروفیل سرعت مربع میانگین ریشه محوری به‌دست‌آمده از روش شبیه سازی گردابه بزرگ و مدل اغتشاشی کی اپسیلون در زاویه 144درجه میل‌لنگ و در فاصله 20 میلی‌متری از سرسیلندر 74
شکل (4-39) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 75 درجه میل لنگ با استفاده از مدل شبیه سازی گردابه بزرگ 76
شکل (4-40) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 75 درجه میل لنگ با استفاده از مدل کی اپسیلون 76
شکل (4-41) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 130 درجه میل لنگ با استفاده از مدل شبیه سازی گردابه بزرگ 76
شکل (4-42) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 130 درجه میل لنگ با استفاده از مدل کی اپسیلون 76

شکل (4-43) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 245 درجه میل لنگ با استفاده از مدل شبیه سازی گردابه بزرگ 77
شکل (4-44) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 245 درجه میل لنگ با استفاده از مدل کی اپسیلون 77
شکل (4-45) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 270 درجه میل لنگ با استفاده از مدل شبیه سازی گردابه بزرگ 77
شکل (4-46) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 270 درجه میل لنگ با استفاده از مدل کی اپسیلون 77
شکل (4-47) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 300 درجه میل لنگ با استفاده از مدل شبیه سازی گردابه بزرگ 78
شکل (4-48) خطوط جریان درون سیلندر در زاویه 300 درجه میل لنگ با استفاده از مدل کی اپسیلون 78
شکل (4-49) خطوط جریان در زاویه 45 درجه میل لنگ برای هندسه حالت اول (سیلندر و پیستون تخت) 81
شکل (4-50) خطوط جریان در زاویه 45 درجه میل لنگ برای هندسه حالت دوم (کاسه سرسیلندر و پیستون تخت) 81
شکل (4-51) خطوط جریان در زاویه 45 درجه میل لنگ برای هندسه حالت سوم (سرسیلندر تخت و کاسه پیستون) 82
شکل (4-52) خطوط جریان در زاویه 45 درجه میل لنگ برای هندسه حالت چهارم (کاسه سرسیلندر و کاسه پیستون) 82
شکل (4-53) خطوط جریان در زاویه 345 درجه میل لنگ برای هندسه حالت اول (سیلندر و پیستون تخت) 83
شکل (4-54) خطوط جریان در زاویه 345 درجه میل لنگ برای هندسه حالت دوم (کاسه سرسیلندر و پیستون تخت) 83
شکل (4-55) خطوط جریان در زاویه 345 درجه میل لنگ برای هندسه حالت سوم (سرسیلندر تخت و کاسه پیستون) 84
شکل (4-56) خطوط جریان در زاویه 345 درجه میل لنگ برای هندسه حالت چهارم (کاسه سرسیلندر و کاسه پیستون) 84
شکل (4-57) بردارهای سرعت در ناحیه نزدیک سر سیلندر برای حالت سرسیلندر تخت در زاویه 345 درجه میل لنگ 84
شکل (4-58) بردارهای سرعت در ناحیه نزدیک سر سیلندر برای حالت کاسه سرسیلندر در زاویه 345 درجه میل لنگ 84

شکل (4-59) بردارهای سرعت در ناحیه نزدیک سطح پیستون برای حالت پیستون تخت در زاویه 345 درجه میل لنگ 85
شکل (4-60) بردارهای سرعت در ناحیه نزدیک سطح پیستون برای حالت کاسه پیستون در زاویه 345 درجه میل لنگ 85
شکل (4-61) مقایسه نرخ گردش جریان برای هندسه دارای کاسه سرسیلندر و کاسه پیستون در زوایای میل لنگ مختلف 86
شکل (4-62) مقایسه نرخ گردش جریان در زاویه 120 درجه میل لنگ برای 4 حالت مختلف هندسه سیلندر و پیستون 87
شکل (4-63) مقایسه نرخ گردش جریان در زاویه 345 درجه میل لنگ برای 4 حالت مختلف هندسه سیلندر و پیستون 88
شکل (4-64) مقایسه انرژی جنبشی اغتشاشی در طول یک سیکل برای 4 حالت مختلف هندسه سیلندر و پیستون 90
شکل (4-65) تغییرات نرخ گردش جریان برحسب تغییرات شعاع کاسه پیستون در زاویه 350 درجه میل لنگ 91
شکل (4-66) تغییرات نرخ گردش جریان برحسب تغییرات عمق کاسه پیستون در زاویه 350 درجه میل لنگ 92

فهرست جدول‌ها

جدول (2-1) ضریب نفوذ و ترم منبع مربوط به معادلات مومنتوم محوری، شعاعی و انرژی 21
جدول (2-2) عبارت‌های ترم منبع مربوط به معادلات مومنتوم محوری، شعاعی و انرژی 24
جدول (2-3) پارامترهای بکار رفته در معادلات مربوط به جریان عبوری از سوپاپ 30
جدول (4-1) مشخصات مونتاژ سیلندر-پیستون متقارن آزمایشگاهی 54

فهرست علائم و نشانه‌ها

چگالی ..... ρ $(kg.m^{-3})$

چگالی درون سیلندر ..... ρ_{cyl} $(kg.m^{-3})$

چگالی مرحله تنظیم حجمی ..... $\rho^{\#}$ $(kg.m^{-3})$

جرم درون سیلندر ..... M_{cyl} (Kg)

سرعت ..... u $(m.s^{-1})$

سرعت تصحیح شده مرحله اول ..... u^{**} $(m.s^{-1})$

سرعت تصحیح شده مرحله دوم ..... u^{***} $(m.s^{-1})$

سرعت شبکه محاسباتی ..... u_G $(m.s^{-1})$

سرعت پیستون ..... u_P $(m.s^{-1})$

سرعت سوپاپ ..... u_V $(m.s^{-1})$

سرعت اصطکاکی ..... u_τ $(m.s^{-1})$

سرعت ورودی در دهانه سوپاپ ..... u_{in} $(m.s^{-1})$

سرعت زاویه‌ای میل‌لنگ ..... N (rpm)

سرعت بی بعد ..... u^+

فشار ..... P $(Kg\cdot m^{-1}s^{-2})$

نمو فشار ..... p' $(Kg\cdot m^{-1}s^{-2})$

فشار درون سیلندر ..... P_{cyl} $(Kg\cdot m^{-1}s^{-2})$

فشار مرحله تنظیم حجمی ..... $P^{\#}$ $(Kg\cdot m^{-1}s^{-2})$

آنتالپی سکون ..... h_S $(m^2\cdot s^{-2})$

آنتالپی ..... h $(m^2\cdot s^{-2})$

دما ..... T (K)

دمای درون سیلندر ..... T_{cyl} (K)

زمان ..... t (S)

ثابت جهانی گازها ..... R $(J.K^{-1}.mole^{-1})$

ظرفیت گرمای ویژه ..... C_p $(J.K^{-1}.mole^{-1})$

تنش برشی ویسکوز ..... $\tau_{i,j}$ $(Kg\cdot m^{-1}s^{-2})$

نرخ کرنش ..... S (s^{-1})

نرخ کرنش فیلترشده ..... $\tilde{S}$ (s^{-1})

ویسکوزیته ملکولی ..... μ $(Kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1})$

ویسکوزیته اسماگورینسکی ..... $(\mathrm{Kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}})$ υ_{SGS}

فاصله سطح سوپاپ از سرسیلندر ..... (m) X_V

فاصله تاج پیستون از سرسیلندر ..... (m) X_P

عمق سرسیلندر ..... (m) X_C

شعاع سیلندر ..... (m) R

شعاع کاسه پیستون ..... (m) r

طول کورس ..... (m) S

طول لقی ..... (m) C

مقیاس طولی ..... (m) L

سطح مقطع ..... $(\mathrm{m^2})$ A

المان حجم سیال ..... $\left(m^3\right)\delta v$

مقیاس طولی کولموگوروف ..... (m) L_k

نقطه مرگ بالا ..... TDC

نقطه مرگ پایین ..... BDC

تابع فیلتر ..... G

عرض فیلتر ..... (m) $\overline{\Delta}$

ضریب تطبیقی اسماگورینسکی ..... C_s

عدد پرانتل ..... σ_h

عدد رینولدز ..... Re

عدد رینولدز محلی ..... Y^+

عدد پکلت ..... Pe

ثابت فون کارمن ..... κ

ضریب تخلیه ..... C_D

نرخ گرمای ویژه ..... γ

نسبت فشار بحرانی ..... X_{cr}

زاویه نشست سوپاپ ..... α

ضریب نفوذ ..... Γ_ϕ

نرخ گردش ..... TR

نرخ چرخش ..... SR

انرژی جنبشی اغتشاشی ..... $(\mathrm{m^2\cdot s^{-2}})$ TKE

ترم منبع ..... S_ϕ

فصل 1: مقدمه

1-1- پیش‌گفتار

قرن بیستم زمان گسترش چشم‌گیر صنعت خودرو در جهان بوده است. بر طبق گزارش‌های تارنمای مرکز اطلاعات صنعت جهانی خودرو، تعداد جهانی خودرو در سال 2010 از مرز یک میلیارد گذشته است و تقریباً اکثر آن‌ها از موتورهای احتراق داخلی پیستونی رفت و برگشتی[1] استفاده می‌کنند. موتور این خودروها بیش از یک میلیارد مترمکعب سوخت فسیلی در طول سال مصرف می‌کند [1]. با توجه به تجدید ناپذیر بودن سوخت‌های فسیلی و از طرفی آلودگی اتمسفر کره زمین نیاز است تا مصرف سوخت موتورهای احتراق داخلی کاهش پیدا کند و به‌اصطلاح موتورهای پاک تولید شود.

در همین راستا ازجمله مسائل مهمی که در طراحی موتورهای احتراق داخلی باید در نظر گرفته شود، کاهش مصرف سوخت، افزایش راندمان و کاهش آلودگی محیط‌زیست در طی فرآیند احتراق می‌باشد. آنالیز جریان ورودی به سیلندر در موتورهای احتراق داخلی همواره یکی از چالش‌های توسعه‌دهندگان صنعت خودرو بوده است. اهمیت شناخت و بررسی جریان ایجادشده در مرحله مکش و تراکم در دهه‌های اخیر موردتوجه محققان زیادی قرارگرفته و تحقیقات گسترده‌ای از طریق روش‌های عددی و آزمایشگاهی در این زمینه صورت گرفته است. درواقع شناخت این جریان می‌تواند اطلاعات طراحی باارزشی را برای مهندسان فراهم آورد. به‌عنوان‌مثال هندسه محفظه احتراق بر روی عملکرد موتور تأثیر بسزایی می‌گذارد و بررسی جزئیات جریان درون سیلندر با اشکال مختلف پیستون می‌تواند پیشنهادهای اساسی برای بهبود فرایند احتراق ارائه دهد، زیرا تغییر در هندسه محفظه احتراق باعث تغییر در میدان جریان سیال در

1 Reciprocating Piston Internal Combustion Engine

انتهای مرحله تراکم می‌شود و این تغییر تأثیر بسزایی بر فرآیند اختلاط سوخت و هوا می‌گذارد [2]. همچنین می‌توان گفت که در طول مرحله تراکم، اغتشاش عمدتاً ناشی از هندسه پیستون می‌باشد. ازجمله عوامل دیگری که در کنار هندسه محفظه احتراق، بر روی فرآیند اختلاط تأثیر می‌گذارند، چرخش ایجادشده درون سیلندر و سیستم پاشش سوخت می‌باشد؛ بنابراین شناخت درست از این جریان و بررسی رفتار آن در مرحله مکش و تراکم این امکان را فراهم می‌سازد تا شرایط مناسب برای فرآیند اختلاط و در کنار آن فرآیند احتراق فراهم آورده شود.

امروزه تحلیل عددی دینامیک سیالات محاسباتی[1] یک ابزار توانا و پرقدرت برای تحلیل جریان سیال و انتقال حرارت در سیستم‌های با هندسه و معادلات پیچیده برای محققین می‌باشد. پیچیدگی معادلات حاکم بر مسئله، تأثیر متقابل پدیده‌های فیزیکی مختلف، گذرا بودن اغلب مسائل مهندسی، بالا بودن هزینه مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت در استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در بسیاری از مسائل عملی ازجمله دلایلی است که استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی را در مقایسه با روش-های عددی محدود می‌کند.

2-1- جریان ورودی به سیلندر

در طی فرآیند مکش در موتورهای احتراق داخلی نوع دیزل، جریان سیال (هوا) از طریق سوپاپ ورودی وارد محفظه سیلندر می‌شود. به این صورت که به دلیل حرکت پیستون از نقطه مرگ بالا[2] به سمت نقطه مرگ پایین[3]، افت فشاری درون محفظه ایجاد می‌شود و این افت فشار باعث مکش جریان به درون سیلندر می‌شود. هندسه درگاه ورودی سوپاپ[4] و برنامه زمان‌بندی باز شدن[5] آن یک جریان سازمان‌یافته درون سیلندر به وجود می‌آورد که شامل حرکت چرخشی[6] (چرخش حول محور سیلندر) و حرکت

1 Computational Fluid Dynamics (CFD)
2 Top Dead Center (TDC)
3 Buttom Dead Center
4 Geometrical Configuration Of The Inlet Ports
5 Opening Schedule
6 Swirl Motion