بسم الله الرحمن الرحيم

٤٨٧٨٣

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی مهندسی

۱۳۸۲ /۱/ ۳۰

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی

# مدلسازی عددی احتراق اسپری در موتورهای احتراق داخلی


تهیه کننده :

سید محمد حسینی

استاد راهنما :

دکتر حسن خالقی



مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران


پاییز ۱۳۸۱


٤٨٧٨٣

دانشگاه تربیت مدرس

# تاییدیه هیات داوران

آقای سیدمحمد حسینی پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **مدلسازی عددی احتراق اسپری در موتورهای احتراق داخلی** در تاریخ ۸۱/۱۰/۳ 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** باگرایش **تبدیل انرژی** پیشنهاد می‌کنند.

| اعضای هیات داوران | نام و نام خانوادگی | امضاء |
|---|---|---|
| ۱ـ استاد راهنما : | آقای دکتر خالقی | |
| ۲ـ استاد مشاور : | | |
| ۳ـ استادان ممتحن : | آقای دکتر معرفت | |
| | آقای دکتر قدیری | |
| | آقای دکتر فرشچی | |
| ۴ـ مدیر گروه : (یا نمایندهٔ گروه تخصصی) | آقای دکتر مسلمی | |

این [illegible] عنوان تست به [illegible] پایان‌نامه/رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما:

بسمه‌تعالی

۱۳۸۲ /۱/ ۳۰

# 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 مکانیک است که در سال ۱۳۸۱ در دانشکدهٔ فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر حسن هادی ، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر 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 سید محمد حسینی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی: سید محمد حسینی

تاریخ و امضاء: ۸۱/۱۰/۲۲

مدیر اطلاعات و آرشیو علمی دانشگاه

تقدیم و تقدیر

# Dedication

تقدیم به پدر و مادر مهربانم که در تمامی مراحل زندگی یار و یاورم بوده اند .

و تقدیم به میهنم و هرآنکه به بالندگی و سازندگی آن می اندیشد .

# تشکر و سپاسگزاری

# Acknowledgements

اینک که به لطف خداوند پایان نامه حاضر به اتمام رسیده است ، بر خود لازم می دانم که از زحمات دلسوزانه و عالمانه استاد گرامی جناب آقای دکتر حسن خالقی که علاوه بر جایگاه والای علمی ، معلم اخلاق نیز برای اینجانب بوده اند تشکر و سپاسگزاری نمایم .

امیداورم که در تمام مراحل زندگی موفق و پیروز باشند .

ازتمامی دوستانی که بطورغیر مستقیم ما را درانجام این پایان نامه یاری کرده اند بخصوص آقای دکترنیکلاس نوردین ( Prof. Niklas Nordin ) و آقای دکترسیدومیر کرالج ( Prof. Cedomir Kralj ) تشکر می نمایم .

## چکیده

این پایان نامه کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی(CFD) را درجریان های دو فازی بهمراه احتراق (واکنش های شیمیایی) وتوربولانس درموتورهای پیستونی نشان می دهد. مدل بکار رفته دراین پایان نامه ازنوع جریان مجزا وفرمولاسیون اولری-لاگرانژی برای آنالیز میدان جریان بکاررفته است . درروش لاگرانژی ازگروهی قطرات استفاده می شود که این تعداد محدود قطرات نماینده کل اسپری می باشد . مسأله با تقارن محوری فرض می شود تا حجم محاسبات کاهش یابد . برای نشان دادن اثراسپری ، ترم های منبع به معادلات فازگازافزوده می شود . تمرکزاصلی این پایان نامه برروی شبیه سازی عددی پدیده احتراق اسپری با تأکید برمدلسازی اثرات متقابل احتراق و توربولانس با بکار بردن جزئیات تقریب شیمیایی است . مدل اثر متقابل احتراق و توربولانس ، اثرات توربولانس در مقیاس میکروسکپی را بر روی شدت واکنش شیمیایی محاسبه می کند . این مدل در کد KIVA3-V اعمال شده است [1,2,3] و نتایج کار برای آنالیز احتراق اسپری درحجم ثابت و دریک موتور دیزلی DI کاملاً موفقیت آمیز بوده است . نتایج بدست آمده با نتایج آزمایش ازلحاظ کیفی تطابق خوبی دارد . محدودیت ها و مشکلات نمایش اسپری درروش لاگرانژی نیز بررسی شده است . در پایان نامه حاضر برای اولین بارمدل راکتور اختلاط جزئی(PaSR) درکد EPISO II اعمال می شود .

کلید واژه ها : موتورهای دیزلی ، مدل اثرمتقابل احتراق – توربولانس ، مدل راکتوراختلاط جزئی ( PaSR )

## Abstract

فهرست مطالب


| | |
|---|---|
| علایم و نشانه ها | د |
| فهرست اشکال و جداول | و |
| ۱- مقدمه | ۱ |
| ۱-۱- انگیزه | ۱ |
| ۱-۲- احتراق توربولانس اسپری دیزل | ۱ |
| ۱-۳- محاسبه لاگرانژی اسپری | ۲ |
| ۱-۴- کدهای CFD | ۵ |
| ۱-۵- ساختمان سمینار | ۶ |
| ۲- معادلات حاکم | ۷ |
| ۲-۱- فاز گاز ( اولری ) | ۷ |
| ۲-۱-۱- معادله پیوستگی | ۷ |
| ۲-۱-۲- معادله ممنتوم | ۸ |
| ۲-۱-۳- معادله انرژی | ۹ |
| ۲-۱-۴- معادلات توربولانس | ۹ |
| ۲-۱-۵- معادلات شیمیایی ( احتراق ) | ۱۲ |
| ۲-۲- فاز مایع ( لاگرانژی ) | ۱۳ |
| ۲-۲-۱- معادله حرکت | ۱۳ |
| ۲-۲-۲- معادله انرژی قطره | ۱۴ |
| ۲-۲-۳- معادله جرم قطره | ۱۶ |
| ۲-۲-۴- مدل اتمایزه شدن | ۱۸ |
| ۲-۲-۵- مدل شکستگی قطره | ۱۸ |
| ۲-۲-۶- مدل برخورد قطرات | ۲۰ |
| ۲-۲-۷- مدل اثر متقابل دیواره و اسپری | ۲۳ |
| ۳- مدل اثر متقابل احتراق و توربولانس | ۲۴ |
| ۳-۱- مقدمه | ۲۴ |
| ۳-۲- پیش زمینه | ۲۴ |

۳-۳- تکنیک گونه های مرجع ۲۵
۳-۴- مفهوم راکتور اختلاط جزیی ۲۸
۳-۵- بحث عددی و نحوه اعمال مدل در کد ۳۵
۴- انفصال معادلات حاکم ۴۰
۴-۱- روش حجم های محدود ۴۰
۴-۲- شبکه محاسباتی ۴۰
۴-۳- انفصال معادلات ۴۱
۴-۳-۱- انفصال معادلات فازگاز ۴۱
۴-۳-۱-۱- معادله کلی انتقال ۴۱
۴-۳-۲- انفصال معادلات ممنتوم ۴۸
۴-۳-۲-۱- معادله ممنتوم محوری ۴۸
۴-۳-۲-۲- معادله ممنتوم شعاعی ۵۰
۴-۳-۳- انفصال معادلات فاز قطره ۵۲
۴-۳-۳-۱- معادلات حرکت ۵۲
۴-۳-۳-۲- معادلات تبخیر قطره ۵۲
۴-۴- الگوریتم PISO ۵۴
۴-۴-۱- مرحله تخمین میدان سرعت ۵۵
۴-۴-۲- مرحله دوم تصحیح سرعت و فشار ۵۷
۴-۵- شرایط اولیه و مرزی ۵۷
۴-۵-۱- شرایط اولیه ۵۷
۴-۵-۲- مرحله دوم تصحیح سرعت و فشار ۵۷
۴-۵-۳- شرایط مرزی درمحل ورود و خروج جریان گاز ۵۷
۴-۵-۴- شرایط مرزی روی دیوار ۵۷
۴-۶- قطرو تعداد قطرات تزریق شده ۵۹
۴-۷- فلوچارت حل مسأله ۶۰
۵- بحث و نتیجه گیری ۶۳
۵-۱- بررسی رفتار اسپری ۶۳
۵-۱-۱- شبکه محاسباتی ۶۴

۵-۱-۲- اثراندازه سلول محاسباتی ۶۵
۵-۱-۳- اثرگام زمانی ۶۵
۵-۱-۴- اثرات تعداد قطرات اضافه شده ( حالت ایزوترم ) ۶۶
۵-۱-۵- اثرات تعداد قطرات اضافه شده ( حالت غیرایزوترم ) ۶۷
۵-۱-۶- اثرات قطرقطرات برمیزان نفوذ ( حالت ایزوترم ) ۶۸
۵-۱-۷- اثرات قطرقطرات برمیزان نفوذ ( حالت غیرایزوترم ) ۶۸
۵-۱-۸ - اثرات پارامترهای مختلف برشدت تبخیر ۶۹
۵-۱-۹- اثرات قطرمتوسط قطرات بر شدت تبخیر ۶۹
۵-۱-۱۰- اثرات دما و فشار برشدت تبخیر ۷۰
۵-۱-۱۱- اثرات فشارگاز برساختاراسپری ۷۰
۵-۱-۱۲- اثرات دمای گازبر ساختاراسپری ۷۱
۵-۱-۱۳- اثرات دانسیته گازبر میزان نفوذ ۷۲
۵-۱-۱۴- اثرات قطرمتوسط بر ساختاراسپری ۷۴
۵-۱-۱۵- مقایسه نمونه اسپری کد EPISO II با سایر کدها ۷۵
۵-۱-۱۶- اثرات اسپری برمیدان جریان ونمایش حرکت اسپری ۷۶
۵-۲- بررسی احتراق ۸۴
۵-۲-۱- شبکه محاسباتی ۸۴
۵-۲-۲- کانتورهای سرعت ۸۷
۵-۲-۳- توزیع دما ۸۹
۵-۲-۴- نمایش اسپری درموتورهای دیزلی ۹۴
نتیجه گیری ۹۶
پیشنهادات ۹۸
ضمائم ۹۹
مراجع ۱۰۲

فهرست علائم و نشانه ها

# Nomenclature

## Latin Letters

| | | |
|---|---|---|
| $c$ | Molar concentration | $mol/m^3$ |
| $C_D$ | Drag coefficient | $-$ |
| $c_p$ | Specific heat at constant pressure | $J/kgK$ |
| $c_{l,d}$ | Liquid specific heat at constant volume | $J/kgK$ |
| $\mathcal{D}$ | Mass diffusion coefficient | $m^2/s$ |
| $D$ | Droplet diameter | $kg$ |
| $e$ | Specific internal energy | $J/kg$ |
| $f_m$ | Chemical source term | $kg/m^3s$ |
| $h_m$ | Specific enthalpy | $J/kg$ |
| $\mathbf{J}$ | Heat flux vector | $W/m^2$ |
| $k$ | Turbulent kinetic energy | $m^2/s^2$ |
| $m_d$ | Droplet mass | $kg$ |
| $\dot{m}_d$ | Droplet evaporation rate | $kg/s$ |
| $m_p$ | Parcel mass | $kg$ |
| $N_r$ | Number of reactions | $-$ |
| $N_s$ | Number of species | $-$ |
| $p$ | Gas pressure | $Pa$ |
| $r$ | Droplet radius | $m$ |
| $\mathbf{S}$ | Rate of strain tensor | $1/s$ |
| $T$ | Gas temperature | $K$ |
| $T_d$ | Liquid droplet temperature | $K$ |
| $\mathbf{u}$ | Gas velocity | $m/s$ |
| $\mathbf{u}_d$ | Droplet velocity | $m/s$ |
| $\mathbf{u}_p$ | Parcel velocity | $m/s$ |
| $V$ | Cell volume | $m^3$ |

علایم یونانی و اعداد بدون بعد

## Greek Letters

| | | |
|---|---|---|
| $\Delta t$ | Integation step | $s$ |
| $\varepsilon$ | Turbulent kinetic energy dissipation rate | $m^2/s^3$ |
| $\mu$ | Gaseous dynamic viscosity | $kg/ms$ |
| $\nu$ | Gaseous kinematic viscosity | $m^2/s$ |
| $\kappa^*$ | Reactive mass fraction | $-$ |
| $\kappa$ | Reaction rate multiplier | $-$ |
| $\kappa$ | Thermal conductivity | $W/mK$ |
| $\rho$ | Gas density | $kg/m^3$ |
| $\rho_l$ | Droplet/parcel/liquid density | $kg/m^3$ |
| $\rho_m$ | Partial density of the gaseous species | $kg/m^3$ |
| $\dot{\rho}_s$ | Total liquid evaporation rate per unit volume | $kg/m^3s$ |
| $\sigma$ | Viscous stress tensor | $N/m^2$ |
| $\tau$ | Integration step | $s$ |
| $\tau_{\mathbf{u}}$ | Momentum relaxation time | $s$ |
| $\tau_e$ | Evaporation relaxation time | $s$ |
| $\tau_h$ | Heat transfer relaxation time | $s$ |
| $\tau_m$ | Turbulent mixing time | $s$ |

## Dimensionless Numbers

| | | |
|---|---|---|
| $Nu$ | Nusselt | total / conductive heat transfer ratio |
| $Oh$ | Ohnesorge | viscous / ( inertia * surface tension )$^{(1/2)}$ force ratio |
| $Pr$ | Prandtl | momentum / thermal diffusion ratio |
| $Re$ | Reynold | inertia / viscous force ratio |
| $Sc$ | Schmidt | momentum / molecular diffusion ratio |
| $Sh$ | Sherwood | mass / molecular diffusion ratio |
| $T$ | Taylor | $Oh\sqrt{We}$ |
| $We$ | Weber | inertia / surface tension force ratio |

فهرست اشکال


| شماره شکل | صفحه |
|---|---|
| ۲-۱- تصویر شماتیک ازپروسه ناپایداری تشکیل قطره | ۱۹ |
| ۲-۲- دوبسته که درحال حرکت بسمت یکدیگرمی باشند | ۲۲ |
| ۳-۱- تصویرمفهومی PaSR | ۲۹ |
| ۳-۲- روش اختلاط واحتراق | ۳۰ |
| ۳-۳- شدت های واکنش بصورت تابعی از غلظت سوخت | ۳۸ |
| ۴-۱- نمایش حجم کنترل اسکالر | ۴۱ |
| ۴-۲- نمایش استفاده ازمیانیابی بین گره های مجاوربرای محاسبه ضرایب وزنی | ۴۶ |
| ۴-۳- حجم کنترل جابجا شده ممنتوم محوری | ۴۸ |
| ۴-۴- نمایش سرعت ها و مساحت ها برای حجم کنترل ممنتوم محوری | ۴۹ |
| ۴-۵- حجم کنترل جابجا شده ممنتوم شعاعی | ۵۱ |
| ۴-۶- نمایش سرعت ها و مساحت ها درحجم کنترل ممنتوم شعاعی | ۵۲ |
| ۴-۷- فلوچارت کلی کد کامپیوتری | ۶۲ |
| ۵-۱- شبکه محاسباتی درحجم ثابت | ۶۴ |
| ۵-۲- اثراندازه سلول محاسباتی | ۶۵ |
| ۵-۳- الف،ب- اثرگام زمانی | ۶۶ |
| ۵-۴-الف،ب- اثرتعداد قطرات اضافه شده درهرگام زمانی (حالت ایزوترم) | ۶۷ |
| ۵-۵-الف،ب- اثرتعداد قطرات اضافه شده درهرگام زمانی (حالت غیرایزوترم) | ۶۷ |
| ۵-۶-الف،ب- اثرقطرقطرات برمیزان نفوذ (حالت ایزوترم) | ۶۸ |
| ۵-۷-الف،ب- اثرقطرقطرات برمیزان نفوذ (حالت غیرایزوترم) | ۶۸ |
| ۵-۸- اثرپارامترهای مختلف برشدت تبخیر | ۶۹ |
| ۵-۹- اثرقطرمتوسط قطرات برشدت تبخیر | ۶۹ |
| ۵-۱۰-الف،ب- اثردما و فشاربرشدت تبخیر | ۷۰ |
| ۵-۱۱-الف،ب- اثرفشارگازبرساختاراسپری | ۷۱ |
| ۵-۱۲-الف،ب- اثردمای گازبرساختاراسپری | ۷۲ |
| ۵-۱۳-الف،ب،ج،د- اثردانسیته گازبرمیزان نفوذ | ۷۳ |

۵-۱۴-الف،ب- اثرقطرمتوسط قطرات ۷۵
۵-۱۵- مقایسه نمونه اسپری کد EPISO II با سایرکدها ۷۶
۵-۱۶- نمایش حرکت اسپری درحجم ثابت ۷۷
۵-۱۷- الف،ب،ج،د،ه،و- بردارهای سرعت ۷۸
۵-۱۸-الف،ب،ج،د،ه،و- کانتورهای درصد جرمی بخارسوخت ۸۱
۵-۱۹-الف،ب،ج،د،ه،و- شبکه محاسباتی درموتورهای احتراق داخلی ۸۴
۵-۲۰-الف،ب،ج،د،ه- بردارهای سرعت ۸۷
۵-۲۱-الف،ب،ج،د،ه،و،ز،ح،ط- توزیع دما ۹۰

## فهرست جداول

شماره جدول — صفحه

۲-۱- ثوابت مدل توربولانس ۱۲
۲-۲- منتخبی ازیک مکانیزم سینتیک شیمیایی ۱۲
۴-۱- ترم های منبع ۴۳
۴-۲- ترم های اثرمتقابل دو فاز ۴۳
۵-۱- طبقه بندی موارد بررسی شده ۶۴

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
پژوهشگاه علوم و فناوری

# مقدمه

# Introduction