بسم الله الرحمن الرحيم

٢٤٩٢٨

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

# مدلسازی عددی احتراق اسپری مایع

محسن نهانی

استاد راهنما

دکتر حسن خالقی

زمستان ۱۳۷۷

۲۴۹۲۱

1891/2

۱۳۷۸ /۴/ ۲۰

دانشگاه تربیت مدرس

# تاییدیه هیات داوران

آقای محسن نهانی پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان مدلسازی عددی احتراق اسپری مایع در تاریخ ۷۷/۱۱/۱۲ 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. ۳۰ب۱۰

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

شماره:.....
تاریخ:.....
پیوست:.....

# 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 مرکز نشر 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* ۱۳۷۷ *در دانشکدهٔ* فنی و مهندسی *دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی ~~سرکار خانم~~/جناب آقای دکتر* حسن خالقی *و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ــــــــــ از آن دفاع شده است.»*

**مادّهٔ ۳** به منظور جبران بخشی از هزینه‌های نشریات دانشگاه تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به مرکز نشر دانشگاه اهدا کند 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 محسن نهانی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

بهمن ۱۳۷۷

# تقدیم

تقدیم به خانواده عزیزم که دلسوزانه مرا در انجام این مسئولیت

تشویق نمودند و در فراز و نشـــیب ایــن راه مــرا در رســیدن

به موفقیت امیدوار کردند .

# تشکر و قدردانی

بر خود واجب میدانم که از استاد بزرگوار و ارجمندم جناب

آقای دکتر حسن خالقی که با راهنماییهای ارزشمند خود مرا

در این راه یاری نموده اند تشکر و قدردانی بجای آورم .

# چکیده

در این پایان نامه، احتراق جت n-dodecane مایع با تقارن محوری[۱] را که درون محیط گازی ( هوا ) پاشیده شده و با آن مخلوط میگردد و از نوع ۲ بعدی ، غیر دائم[۲] و توربولانس میباشد در دستگاه مختصات استوانه ای مورد تحلیل عددی قرار داده ایم. برای مدلسازی میدان جریان اسپری از مدل قطرات مجزا[۳] که بر اساس روش اولری - لاگرانژی است استفاده نموده و توربولانس را با استفاده از مدل $k-\varepsilon$ ، پدیده تبخیر را بوسیله معادلات Borman & Johnson و اتمیزاسیون را توسط فرمولاسیون Johnson & Gosman مدل کرده ایم. واکنش سوختن سوخت ، استوکیومتریک و از نوع یک مرحله ای فرض شده و نرخ واکنش توسط روابط آرنیوس و مدل شکست ادی[۴] ها بدست آمده و برای محاسبه زمان واکنش از فرمول تاخیر در اشتعال[۵] ارائه شده توسط Hardenberg & Hase استفاده شده است. اثرات متقابل جریان دوفازی گاز- قطرات و احتراق نیز بصورت جملات منبع[۶] در معادلات ظاهر شده اند.

معادلات با روش عددی حجم های محدود[۷] منفصل گشته و به جز معادلات تصحیح فشار که بصورت کاملاً ضمنی[۸] بوده اند همه معادلات بقای فاز گاز بصورت صریح[۹] منفصل شدند. وابستگی معادلات منفصل شده ضمنی و تابع زمان را بوسیله الگوریتم PISO ازبین برده ایم. بنابر این به غیر از معادلات تصحیح فشار ، همه معادلات را میتوان به روش نقطه به نقطه[۱۰] حل نمود و تمهیدات خاصی برای آنها لازم نمی باشد. برای حل معادلات تصحیح فشار از یک line solver استفاده شده که معادلات منفصل شده را در امتداد یک خط از گره ها و در یک مرحله زمانی حل می کند. برای سهولت در حل، این معادلات بفرم ۳ قطری در آمده و با استفاده از روش تکرار حل میشوند. بدین ترتیب در مورد زمان از تقریب جلورونده[۱۱] و در مورد گرادیان فشار در معادله

---

۱. axisymmetric
۲. unsteady
۳. discrete droplet model ( DDM )
۴. eddy break up model
۵. ignition delay
۶. source terms
۷. finite volume
۸. fully implicit
۹. explicit
۱۰. point by point
۱۱. forward differencing

ممنتوم از تقریب زمانی عقب رونده[۱] استفاده شده که در نهایت منجر به یک تقریب نیمه - ضمنی[۲] میگردد و میتوان با حفظ پایداری معادلات مقدار فاصله زمانی ( $\Delta t$ ) را بزرگ نمود. در جهت مکانی از تقریب ترکیبی[۳] که شامل تقریب بالادست[۴] و تقریب مرکزی[۵] میباشد استفاده شده که بدین لحاظ می توان برای طیف وسیعی از اعداد رینولدز جریان جوابهای دقیق داشت. به جز معادلات مربوط به تصحیح فشار که بصورت تکراری[۶] و با روش خط به خط[۷] حل میگردند، دستگاه معادلات منفصل شده بصورت نقطه به نقطه حل میشوند.

در مورد معادلات فاز قطره به جز معادلات بقای جرم و انرژی که بصورت نیمه - ضمنی[۸] هستندو نیاز به تکرار دارند، بقیه معادلات بفرم صریح میباشند. با این وجود بواسطه اینکه قطرات بدون اندرکنش[۹] هستند لذا همه معادلات به نوبت برای هرقطره قابل حل میباشند.


## کلید واژه

احتراق اسپری مایع

روش اولری - لاگرانژی

مدل قطرات مجزا

واکنش سوختن


۱. back ward differencing

۲. semi-implicit

۳. hybrid

۴. Upwind

۵. Centeral differencing

۶. iterative

۷. line by line

۸. semi - implicit

۹. non-interacting

# فهرست مطالب


| عنوان | صفحه |
|---|---|
| مقدمه | ۱ |
| **فصل اول - تئوری مدل قطرات مجزا و توصیف میدان پاشش اسپری** | |
| ۱-۱. مقدمه | ۳ |
| ۱-۲. فرمولاسیون ریاضی | ۴ |
| ۱-۲-۱. فرضیات اساسی | ۴ |
| ۱-۲-۲. معادلات فاز قطره | ۴ |
| ۱-۲-۳. معادلات بقای فاز گاز | ۵ |
| ۱-۳-۲-۱. معادله پیوستگی | ۵ |
| ۲-۳-۲-۱. معادلات حرکت | ۷ |
| ۳-۳-۲-۱. معادلات توربولانس | ۱۱ |
| ۴-۳-۲-۱. معادله انرژی | ۱۳ |
| ۵-۳-۲-۱. معادله جزء جرمی بخار سوخت | ۱۴ |
| ۴-۲-۱. اثر حرکت توربولانس بر قطرات | ۱۴ |
| ۵-۲-۱. معادلات کمکی | ۱۵ |
| ۱-۵-۲-۱. فاز گاز | ۱۵ |
| ۱-۱-۵-۲-۱. معادله حالت | ۱۵ |
| ۲-۱-۵-۲-۱. لزجت آرام | ۱۵ |
| ۳-۱-۵-۲-۱. گرمای ویژه مخلوط | ۱۵ |
| ۴-۱-۵-۲-۱. فشار جزء بخار سوخت | ۱۶ |
| ۲-۵-۲-۱. فاز مایع | ۱۶ |
| ۱-۲-۵-۲-۱. چگالی | ۱۶ |
| ۲-۲-۵-۲-۱. گرمای ویژه | ۱۶ |
| ۳-۲-۵-۲-۱. گرمای نهان تبخیر | ۱۶ |
| ۳-۵-۲-۱. مرز مشترک گاز و مایع | ۱۶ |
| ۱-۳-۵-۲-۱. فشار جزئی در سطح قطره | ۱۶ |

# فهرست مطالب


| عنوان | صفحه |
|---|---|
| ۲-۳-۵-۲-۱. ثابت گاز | ۱۶ |
| ۳-۳-۵-۲-۱. لزجت | ۱۷ |
| ۴-۳-۵-۲-۱. ضریب پخش | ۱۷ |
| ۵-۳-۵-۲-۱. ضریب هدایت حرارتی | ۱۷ |
| **فصل دوم - بررسی پدیده احتراق اسپری و تکمیل مدل** | |
| ۱-۲. مقدمه | ۱۸ |
| ۲-۲. مشخصه های احتراق اسپری | ۱۸ |
| ۳-۲. نرخ واکنش | ۲۸ |
| ۱-۳-۲. عبارت نرخ واکنش و پارامترهای مؤثر در آن | ۲۹ |
| ۲-۳-۲. فرکانس کلی برخورد | ۳۰ |
| ۳-۳-۲. معادله آرنیوس | ۳۳ |
| ۴-۳-۲. انرژی اکتیواسیون | ۳۶ |
| ۴-۲. واکنش سوختن و شروع احتراق | ۳۹ |
| ۵-۲. معادلات بقای حاکم بر احتراق | ۴۲ |
| ۱-۵-۲. معادله پیوستگی | ۴۳ |
| ۲-۵-۲. معادلات ممنتوم | ۴۳ |
| ۳-۵-۲. معادلات توربولانس | ۴۳ |
| ۴-۵-۲. معادله انرژی | ۴۳ |
| ۵-۵-۲. معادله جزء جرمی بخار سوخت | ۴۴ |
| ۶-۵-۲. معادله جزء جرمی اکسید کننده | ۴۴ |
| ۷-۵-۲. معادله مربع نوسانات غلظت | ۴۵ |
| ۸-۵-۲. معادله کلی انتقال | ۴۵ |
| **فصل سوم - ملاحظات و روش حل عددی** | |
| ۱-۳. مقدمه | ۴۷ |
| ۲-۳. شبکه محاسباتی | ۴۷ |

# فهرست مطالب


| عنوان | صفحه |
|---|---|
| ۳-۳. تقریب تفاضلهای محدود و انفصال معادلات | ۴۹ |
| ۱-۳-۳. معادله کلی انتقال | ۵۰ |
| ۱-۱-۳-۳. معادله پیوستگی | ۵۳ |
| ۲-۱-۳-۳. معادله ممنتوم محوری | ۵۳ |
| ۳-۱-۳-۳. معادله ممنتوم شعاعی | ۵۴ |
| ۴-۱-۳-۳. معادلات توربولانس | ۵۵ |
| ۵-۱-۳-۳. معادله انرژی | ۵۶ |
| ۶-۱-۳-۳. معادله جزء جرمی بخار سوخت | ۵۷ |
| ۷-۱-۳-۳. معادله جزء جرمی اکسید کننده | ۵۷ |
| ۸-۱-۳-۳. معادله مربع نوسانات غلظت | ۵۷ |
| ۲-۳-۳. معادلات فاز قطره | ۵۸ |
| ۱-۲-۳-۳. معادلات حرکت | ۵۸ |
| ۲-۲-۳-۳. معادلات تبخیر قطره | ۵۹ |
| ۳-۳-۳. اثرات متقابل سرعت های گاز و قطرات | ۶۰ |
| ۴-۳-۳. الگوریتم PISO و معادله تصحیح فشار | ۶۳ |
| ۴-۳. شرایط اولیه | ۶۶ |
| ۵-۳. شرایط مرزی | ۶۷ |
| ۱-۵-۳. محور تقارن | ۶۷ |
| ۲-۵-۳. مرز جریان آزاد | ۶۷ |
| ۳-۵-۳. مرز خروجی جریان | ۶۷ |
| ۴-۵-۳. مرز ورودی جریان | ۶۷ |
| ۵-۵-۳. شرایط مرزی در نازل | ۶۸ |
| ۱-۵-۵-۳. موقعیت قطرات تزریق شده | ۶۸ |
| ۲-۵-۵-۳. سرعت قطرات تزریق شده | ۶۹ |
| ۳-۵-۵-۳. مدل اتمیزاسیون | ۷۰ |
| ۴-۵-۵-۳. قطر و تعداد قطرات تزریق شده | ۷۰ |

# فهرست مطالب


| عنوان | صفحه |
|---|---|
| ۶-۵-۳. شرایط مرزی روی دیواره ها | ۷۱ |
| ۶-۳. تعیین سلول احتراق | ۷۲ |
| ۷-۳. دیاگرام جریانی مدلسازی اسپری همراه با احتراق | ۷۳ |
| **فصل چهارم - بررسی و جمع بندی نتایج** | |
| ۱-۴. مقدمه | ۷۶ |
| ۲-۴. شبکه بندی | ۷۶ |
| ۳-۴. مشخصه های احتراق اسپری | ۷۷ |
| ۴-۴. اثرات تغییرات فشار و درجه حرارت | ۸۱ |
| ۵-۴. خواص میدان جریان در حال اشتعال | ۸۱ |
| ۶-۴. پیشنهادات برای بررسی های بعدی | ۹۲ |
| **فهرست منابع** | ۹۳ |

# فهرست جداول


| شماره | عنوان | صفحه |
|---|---|---|
| ---- | نمایش سیستمهای احتراق اسپری | ۲ |
| ۱-۱ | ضرایب ثابت مدل توربولانس | ۱۳ |
| ۱-۲ | جدول خواص سوخت های نفتی | ۴۰ |
| ۲-۲ | مقادیر ثابت های رابطه (۱۸-۲ ) مربوط به محاسبه نرخ واکنش | ۴۲ |
| ۲-۳ | مقادیر $S_\phi$ و $\Gamma_\phi$ برای کمیت های گوناگون $\phi$ در معادله (۲۹-۲ ) | ۴۶ |

# فهرست اشکال و نمودارها


| شماره | عنوان | صفحه |
|---|---|---|
| ۱-۱ | المان استوانه ای در میدان جریان | ۶ |
| ۱-۲ | تنش های وارد شده بر المانی از یک جریان با تقارن محوری | ۷ |
| ۱-۲ | شکل شماتیک احتراق سوخت گازی شکل پیش مخلوط و احتراق اسپری | ۱۹ |
| ۲-۲ | پروفیل های شعاعی درجه حرارت ، سرعت و دبی جرمی قطرات در شعله اسپری | ۲۰ |
| ۲-۳ | کانتورهای سرعت ، توربولانس و درجه حرارت مربوط به شعله اسپری نفت سفید با $SMD = 45\ \mu m$ | ۲۲ |
| ۲-۴ | توزیع سرعت و درجه حرارت در شعله اسپری نفت سفید با $SMD = 45\ \mu m$ : منحنی ها مربوط به شعله گازی شکل شبیه سازی شده هستند | ۲۳ |
| ۲-۵ | پروفیل های شعاعی درجه حرارت : منحنی ها مربوط به شعله گازی شکل شبیه سازی شده هستند $SMD = 45\ \mu m$ ● و $SMD = 100\ \mu m$ ○ | ۲۳ |
| ۲-۶ | توزیع کمیت های گوناگون در امتداد محور شعله احتراق اسپری | ۲۴ |
| ۲-۷ | توزیع کمیت های گوناگون در امتداد محور شعله پخش شونده گازی شکل | ۲۴ |
| ۲-۸ | نمایش شماتیک یک شعله پخش شونده اسپری هم محور | ۲۶ |
| ۲-۹ | نمایش فاصله مورد نیاز برای برخورد دو مولکول | ۳۰ |
| ۲-۱۰ | نمایش برخوردهای یک مولکول با شعاع $\sigma$ و متحرک با مولکولهای ساکن دیگر.تعداد مولکولهای موجود در حجم جاروب شده توسط این مولکول متحرک برابر با تعداد برخوردهای این مولکول با مولکولهای دیگر است | ۳۱ |
| ۲-۱۱ | نمایش جهات ممکن برای برخورد دو مولکول ید و هیدروژن | ۳۴ |
| ۲-۱۲ | نمایش وابستگی ثابت ویژه نرخ واکنش به درجه حرارت | ۳۵ |
| ۲-۱۳ | نمایش وابستگی مقدار ثابت ویژه نرخ واکنش به محدوده درجه حرارت برای واکنش های مختلف | ۳۵ |

# فهرست اشکال و نمودارها


| شماره | عنوان | صفحه |
|---|---|---|
| ۲-۱۴ | نمایش تغییر فاصله بین دو اتم در یک مولکول در اثر نزدیک شدن یک اتم آزاد | ۳۷ |
| ۲-۱۵ | تغییرات انرژی پتانسیل در طی مختصه واکنش : a. واکنش گرمازا b. واکنش گرماگیر | ۳۷ |
| ۲-۱۶ | منحنی های تغییرات غلظت مواد اولیه و محصولات بر حسب زمان ، $C_x$ معرف بخشی از غلظت مواد اولیه است که در واکنش شرکت میکنند | ۳۸ |
| ۳-۱ | نمایش شبکه محاسباتی | ۴۸ |
| ۳-۲ | نمایش حجم کنترلهای کمیت های اسکالر و بردار سرعت | ۴۸ |
| ۳-۳ | نمایش استفاده از میانیابی خطی بین گره های مجاور برای محاسبه ضرایب وزنی | ۵۲ |
| ۳-۴ | جزئیات حجم کنترل سرعت های محوری | ۵۴ |
| ۳-۵ | جزئیات حجم کنترل سرعت های شعاعی | ۵۵ |
| ۳-۶ | نمایش هندسه سلول پاشش | ۶۸ |
| ۳-۷ | دیاگرام جریانی شبیه سازی اسپری همراه با احتراق | ۷۵ |
| ۴-۱ | نمایش شبکه بندی میدان حل در تحلیل عددی | ۷۷ |
| ۴-۲ | توزیع سرعت روی خط مرکزی برای شعله اسپری n-dodecane با $SMD = 45\ \mu m$ | ۷۸ |
| ۴-۳ | توزیع پروفیل شعاعی درجه حرارت برای شعله اسپری n-dodecane با $SMD = 45\ \mu m$ | ۷۸ |
| ۴-۴ | منحنی تغییرات درجه حرارت قطره و مقایسه مدلهای مختلف تبخیر | ۷۹ |
| ۴-۵ | منحنی رفتار کلی قطره ای از توده اسپری | ۷۹ |
| ۴-۶ | شعله پخش شونده اسپری بدست آمده از نتایج عددی | ۸۰ |
| ۴-۷ | اثر تغییرات فشار و دما بر نرخ واکنش بر حسب دما | ۸۲ |
| ۴-۸ | نمایش میدان سرعت در لحظات مختلف احتراق | ۸۴ |
| ۴-۹ | نمایش توزیع درجه حرارت در لحظات مختلف احتراق | ۸۵ |
| ۴-۱۰ | نمایش توزیع فشار در لحظات مختلف احتراق | ۸۶ |