



دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

عنوان:

شبیه سازی شعله های جریان مخالف گاز طبیعی - هوا رقیق شده با آب و دی اکسید کربن

استاد راهنما:

دکتر جواد خادم

نگارش:

علی اسدی (۸۸۱۳۳۱۷۱۲۵)

تابستان ۱۳۹۰

تقدیر و تشکر

سپاس فراوان خداوندگار مهربان را که با قلم عشق و قدرتش جهان هستی را به زیور علم و ایمان مزین نموده و در سایه رحمت بی‌پایانش همه کائنات را از عشق بی‌دریغش برخوردار نموده است و فرصتی را نصیب ما فرموده است تا بتوانیم بنیه علمی خود را محک بزنییم و به کاستی‌های علم خود واقف گردیم. اکنون که به یاری یاریگر متعال توفیق یافته‌ام این پایان‌نامه را به پایان برسانم بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استاد ارجمند

جناب آقای دکتر جواد خادم

تشکر و قدردانی نمایم و از خداوند منان برای آن بزرگوار آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

تقدیم به

پدر و سوز

مادر فداکار

و همسر مهربانم

چکیده

نظر به اینکه گاز طبیعی در بخش اعظم جهان صنعتی به یک منبع انرژی بسیار مهم تبدیل شده است، بررسی ساختار شعله و اثر آلاینده‌های آن بر محیط زیست امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. در مقاله‌ی حاضر، احتراق گاز طبیعی که ترکیبی از هیدروکربن‌هایی مانند CH_4 ، C_2H_6 ، C_3H_8 و نیز گازهای N_2 ، CO_2 ، O_2 و H_2 است، با استفاده از مدل شعله‌ی نفوذی جریان مخالف بررسی شده است. با توجه به هندسه‌ی خاص مسئله، معادلات در دستگاه مختصات متقارن محوری نوشته می‌شوند. حل معادلات با استفاده از یک کد عددی به نام OPPDIF انجام شده است و این کد در مجموعه‌ی نرم‌افزار CHEMKIN موجود است. در این تحقیق منحنی-های دما، غلظت گونه‌ها و ترکیبات NO_x با استفاده از حل عددی بدست آمده و اثر رقیق‌کننده‌های CO_2 و H_2O بر توزیع دما و نرخ تولید گونه‌ها بررسی می‌شود. با توجه به توانایی بالای مکانیزم GRI3.0 در مدل‌سازی احتراق گاز طبیعی، این مکانیزم به عنوان سنتیک شیمیایی انتخاب شده است. این مکانیزم شامل ۳۲۵ واکنش برگشت‌پذیر از ۵۳ گونه است. برای بررسی اعتبار نتایج به مقایسه‌ی منحنی دمای احتراق هیدروژن- هوای رقیق‌شده با نیتروژن که مهمترین منحنی احتراق گاز در مدل شعله‌ی نفوذی جریان مخالف است، پرداختیم. نتایج عددی منحنی‌های دما در دو نرخ کرنش مختلف، مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. افزایش رقیق-سازها در سوخت باعث کاهش ماکزیمم دمای احتراق می‌شود که این دلیل کاهش غلظت واکنش‌دهنده‌ها و در نتیجه کاهش شدت واکنش کلی است. رقیق‌ساز CO_2 نسبت به آب توانایی بیشتری در کاهش دما دارد. این رقیق‌سازها همچنین ماکزیمم کسر مولی گونه‌های C_2H_2 و NO_x را کاهش می‌دهند (C_2H_2 یک پیش ماده‌ی مهم در تولید دوده و NO_x از آلاینده‌های محیطی است). در این مورد رقیق‌ساز CO_2 توانایی بیشتری در کاهش C_2H_2 (و بنابراین دوده) و رقیق‌ساز آب توانایی بیشتری در کاهش NO_x دارد. ماکزیمم دما با افزایش فشار افزایش می‌یابد. نکته‌ی مهم در اینجا این است که اشتعال پذیری در محدوده‌ی فشار با افزایش درصد رقیق‌ساز CO_2 افزایش و با افزایش درصد رقیق‌ساز آب کاهش می‌یابد. علت این پدیده اثرات شیمیایی رقیق‌کننده‌ها و نیز اثر خنک‌سازی و خاموش‌کنندگی رقیق‌ساز آب می‌باشد. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که مکانیزم GRI3.0 را می‌توان به یک مکانیزم مختصرتر تبدیل کرد، بطوری که نتایج حاصله با مکانیزم کاهش‌ی پیشنهادی

کار حاضر دارای تطابق خوبی با نتایج مکانیزم GRI3.0 می‌باشد. مکانیزم کاهش‌ی پیشنهادی ۵۰ واکنش و ۵ گونه از مکانیزم اصلی کمتر دارد.

فهرست جداول

- جدول ۱-۱. مثال‌هایی برای سیستم‌های احتراقی در طبقه بندی آنها..... ۱۱
- جدول ۱-۲. پارامترهای تجربی تعیین کننده‌ی ثابت شدت واکنش (۱۰ واکنش ابتدایی مکانیزم GRI3.0)..... ۲۷
- جدول ۲-۲. خروجی یک مسئله‌ی آنالیز جریان واکنش..... ۲۹
- جدول ۱-۴. مشخصات هندسی و داده‌های ورودی مسئله..... ۵۲
- جدول ۲-۴. ترکیب گاز طبیعی مورد استفاده در شبیه سازی..... ۵۲

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. جبهه‌ی شعله‌ی آرام (سمت چپ) و جبهه‌ی شعله‌ی مغشوش (سمت راست)..... ۱۲
- شکل ۱-۲. شماتیک هندسه‌ی شعله‌ی نفوذی جریان مخالف. (a) جت‌های جریان مخالف سوخت و اکسیدکننده (b) مشعل خلل و فرج دار و جت اکسیدکننده..... ۱۴
- شکل ۱-۳. تصویر شعله‌ی تخت نفوذی [۸]..... ۱۴
- شکل ۱-۴. تصویر خطوط جریان شعله‌ی تخت نفوذی [۸]..... ۱۵
- شکل ۱-۲. هندسه‌ی جریان مخالف نفوذی..... ۱۹
- شکل ۲-۲. حجم کنترل برای تحلیل یک بعدی قانون بقای گونه‌ها..... ۲۰
- شکل ۲-۳. حجم کنترل برای تحلیل یک بعدی قانون بقای انرژی..... ۲۱
- شکل ۲-۴. حجم برخورد ایجاد شده بوسیله‌ی یک مولکول به قطر..... ۲۴
- شکل ۲-۳. آنالیز جریان واکنش انتگرالی در یک شعله‌ی پیش‌آمیخته‌ی استوکیومتریک CH_4 - هوا در $P=1\text{bar}$ و $T=298\text{K}$ [۲۶]..... ۳۰
- شکل ۱-۳. دیاگرام اجرای Oppdif..... ۳۳
- شکل ۲-۳. تعدادی از مدل‌های موجود در نرم‌افزار کمکین..... ۴۴
- شکل ۳-۳. ایجاد یک پروژه‌ی جدید..... ۴۴
- شکل ۳-۴. مدل‌سازی مسئله با استفاده از المان‌ها..... ۴۵
- شکل ۳-۵. وارد کردن اطلاعات مربوط به مکانیزم شیمیایی..... ۴۵
- شکل ۳-۶. وارد کردن اطلاعات مربوط به راکتور..... ۴۶
- شکل ۳-۷. وارد کردن اطلاعات مربوط به شبکه..... ۴۶
- شکل ۳-۸. وارد کردن اطلاعات مربوط به اکسیدکننده..... ۴۷
- شکل ۳-۹. وارد کردن اطلاعات مربوط به سوخت..... ۴۷
- شکل ۳-۱۰. وارد کردن اطلاعات مربوط به حلگر..... ۴۸
- شکل ۱۱-۳. نمایش خروجی برنامه..... ۴۸
- شکل ۱۲-۳. خروجی‌های برنامه..... ۴۹
- شکل ۱-۴. منحنی دما بر حسب فاصله در احتراق جریان مخالف نفوذی هیدروژن، $a=120(1/s)$, $X_{\text{H}_2}=0.6667$ ۵۱

- شکل ۴-۲. منحنی دما بر حسب فاصله در احتراق جریان مخالف نفوذی هیدروژن، $a=84.1(1/s)$, $X_{H_2}=0.8265$ ۵۲
- شکل ۴-۳. منحنی دما بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۳
- شکل ۴-۴. منحنی کسر سوخت در ترکیب بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۳
- شکل ۴-۵. منحنی چگالی بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۴
- شکل ۴-۶. منحنی فاکتور F بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۵
- شکل ۴-۷. منحنی فاکتور G بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۵
- شکل ۴-۸. کسر مولی گونه‌های CH_4 ، N_2 و O_2 بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۶
- شکل ۴-۹. کسر مولی گونه‌های CO و CO_2 بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۶
- شکل ۴-۱۰. کسر مولی گونه‌های HCN و NO بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۷
- شکل ۴-۱۱. کسر مولی گونه‌ی NO_2 بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۷
- شکل ۴-۱۲. کسر مولی گونه‌ی C_2H_2 بر حسب فاصله از نازل ورودی سوخت..... ۵۸
- شکل ۴-۱۳. نمودار دما بر حسب فاصله در مقادیر مختلف رقیق سازی با CO_2 ۵۹
- شکل ۴-۱۴. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب درصد رقیق سازی CO_2 ۵۹
- شکل ۴-۱۵. نمودار کسر مولی گونه‌ی C_2H_2 بر حسب فاصله در مقادیر مختلف رقیق سازی با CO_2 ۶۰
- شکل ۴-۱۶. نمودار کسر مولی NO_2 بر حسب فاصله در مقادیر مختلف رقیق سازی با CO_2 ۶۰
- شکل ۴-۱۷. نمودار کسر مولی NO بر حسب فاصله در مقادیر مختلف رقیق سازی با CO_2 ۶۱
- شکل ۴-۱۸. نمودار دما بر حسب فاصله در مقادیر مختلف فشار برای گاز طبیعی..... ۶۲
- شکل ۴-۱۹. نمودار دما بر حسب فاصله در مقادیر مختلف فشار برای گاز طبیعی همراه با ۱۵٪ رقیق ساز CO_2 ۶۲
- شکل ۴-۲۰. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب فشار در مقادیر مختلف رقیق سازی با CO_2 ۶۳
- شکل ۴-۲۱. نمودار دمای ماکزیمم- دمای اکسیدکننده در مقادیر مختلف رقیق سازی با CO_2 ۶۴
- شکل ۴-۲۲. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب دمای سوخت در مقادیر مختلف رقیق سازی با CO_2 ۶۴
- شکل ۴-۲۳. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در حضور رقیق ساز CO_2 ۶۵
- شکل ۴-۲۴. نمودار ماکزیمم کسر مولی C_2H_2 بر حسب نرخ کرنش در حضور رقیق ساز CO_2 ۶۵
- شکل ۴-۲۵. نمودار ماکزیمم کسر مولی NO_2 بر حسب نرخ کرنش در حضور رقیق ساز CO_2 ۶۶
- شکل ۴-۲۶. نمودار ماکزیمم کسر مولی NO_2 بر حسب نرخ کرنش در حضور رقیق ساز CO_2 ۶۶

- شکل ۴-۲۷. نمودار تغییرات دما بر حسب فاصله در مقادیر مختلف رقیق سازی با آب..... ۶۷
- شکل ۴-۲۸. نمودار تغییرات دمای ماکزیمم بر حسب درصد آب اضافه شده..... ۶۷
- شکل ۴-۲۹. نمودار کسر مولی C_2H_2 بر حسب فاصله در مقادیر مختلف رقیق سازی با آب..... ۶۸
- شکل ۴-۳۰. نمودار کسر مولی NO_2 بر حسب فاصله در مقادیر مختلف رقیق سازی با آب..... ۶۸
- شکل ۴-۳۱. کسر مولی NO بر حسب فاصله در مقادیر مختلف رقیق سازی با آب..... ۶۹
- شکل ۴-۳۲. نمودار دما بر حسب فاصله در مقادیر مختلف فشار برای گاز طبیعی با ۱۵٪ آب..... ۶۹
- شکل ۴-۳۳. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب فشار در مقادیر مختلف رقیق سازی با آب..... ۷۰
- شکل ۴-۳۴. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب دمای اکسیدکننده در مقادیر مختلف رقیق سازی با آب..... ۷۰
- شکل ۴-۳۵. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب دمای سوخت در مقادیر مختلف رقیق سازی با آب..... ۷۱
- شکل ۴-۳۶. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در حضور رقیق ساز آب..... ۷۱
- شکل ۴-۳۷. نمودار ماکزیمم کسر مولی C_2H_2 بر حسب نرخ کرنش در حضور رقیق ساز CO_2 ۷۲
- شکل ۴-۳۸. نمودار ماکزیمم کسر مولی NO_2 بر حسب نرخ کرنش در حضور رقیق ساز CO_2 ۷۲
- شکل ۴-۳۹. نمودار ماکزیمم کسر مولی C_2H_2 بر حسب نرخ کرنش در حضور رقیق ساز CO_2 ۷۲
- شکل ۴-۴۰. نمودار دما بر حسب درصد رقیق کننده در حالت های گاز طبیعی رقیق شده با CO_2 و آب..... ۷۳
- شکل ۴-۴۱. نمودار کسر مولی C_2H_2 بر حسب فاصله در حالت های گاز طبیعی رقیق شده با ۱۵٪ CO_2 و ۱۵٪ آب..... ۷۴
- شکل ۴-۴۲. نمودار کسر مولی NO_2 بر حسب فاصله در حالت های گاز طبیعی رقیق شده با ۱۵٪ CO_2 و ۱۵٪ آب..... ۷۴
- شکل ۴-۴۳. نمودار کسر مولی NO بر حسب فاصله در حالت های گاز طبیعی رقیق شده با ۱۵٪ CO_2 و ۱۵٪ آب..... ۷۴
- شکل ۴-۴۴. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب فشار در حالت های گاز طبیعی رقیق شده با ۱۵٪ CO_2 و ۱۵٪ آب..... ۷۵
- شکل ۴-۴۵. نمودار دمای ماکزیمم بر حسب نرخ کرنش در حالت های گاز طبیعی رقیق شده با ۱۵٪ CO_2 و ۱۵٪ آب..... ۷۶
- شکل ۴-۴۶. نمودار ماکزیمم کسر مولی C_2H_2 بر حسب نرخ کرنش در حالت های گاز طبیعی رقیق شده با ۱۵٪ CO_2 و ۱۵٪ آب..... ۷۶
- شکل ۴-۴۷. نمودار ماکزیمم کسر مولی NO_2 بر حسب نرخ کرنش در حالت های گاز طبیعی رقیق شده با ۱۵٪ CO_2 و ۱۵٪ آب..... ۷۶
- شکل ۴-۴۸. نمودار ماکزیمم کسر مولی NO بر حسب نرخ کرنش در حالت های گاز طبیعی رقیق شده با ۱۵٪ CO_2 و ۱۵٪ آب..... ۷۷

- شکل ۴-۴۹. مسیر واکنش اکسیداسیون متان به CO_2 ۷۸
- شکل ۴-۵۰. مسیر واکنش اکسیداسیون متان به آب..... ۷۸
- شکل ۴-۵۱. مسیر واکنش CH_3OH به CO_2 ۷۹
- شکل ۴-۵۲. نرخ پیشرفت متان به دو گونه‌ی CH_3 و CH_3OH ۸۰
- شکل ۴-۵۳. نمودار آنالیز حساسیت گونه‌ی CH_3 ۸۱
- شکل ۴-۵۴. نمودار آنالیز حساسیت گونه‌ی CH_3OH ۸۱
- شکل ۴-۵۵. منحنی تاخیر زمانی اشتعال برای دو مکانیزم GRI3.0 و مکانیزم Reduced GRI3.0 بر اساس ماکزیمم کسر مولی گونه‌ی OH ۸۲
- شکل ۴-۵۶. منحنی تاخیر زمانی اشتعال برای دو مکانیزم GRI3.0 و مکانیزم Reduced GRI3.0 بر اساس ماکزیمم شیب منحنی دما..... ۸۳
- شکل ۴-۵۷. منحنی‌های دما بر حسب فاصله با استفاده از دو مکانیزم GRI3.0 و Reduced GRI3.0 ۸۳
- شکل ۴-۵۸. منحنی‌های سرعت محوری بر حسب فاصله با استفاده از دو مکانیزم GRI3.0 و Reduced GRI3.0 ۸۳
- شکل ۴-۵۹. منحنی کسر مولی OH بر حسب فاصله با استفاده از دو مکانیزم GRI3.0 و Reduced GRI3.0 ۸۴
- شکل ۴-۶۰. منحنی کسر مولی CO_2 بر حسب فاصله با استفاده از دو مکانیزم GRI3.0 و Reduced GRI3.0 ۸۴
- شکل A1. مسیر تولید NO در مکانیزم فنیور، حاصل از ترکیب یک سوخت نیتروژن دار و یک هیدروکربن..... ۹۸

چکیده..... ۸

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱. شعله و انواع آن..... ۱۱
- ۱-۱-۱. شعله‌های پیش آمیخته‌ی آرام..... ۱۱
- ۱-۱-۲. شعله‌های پیش آمیخته‌ی مغشوش..... ۱۲
- ۱-۱-۳. شعله‌های غیر پیش آمیخته‌ی (نفوذی) آرام..... ۱۲
- ۱-۱-۴. شعله‌های غیر پیش آمیخته‌ی (نفوذی) مغشوش..... ۱۲
- ۲-۱. مروری بر تحقیقات انجام شده..... ۱۳

فصل دوم: تئوری شعله‌ی نفوذی جریان مخالف

- ۱-۲. معادلات حاکم..... ۱۹
- ۲-۲. سنتیک شیمیایی..... ۲۳
- ۳-۲. آنالیز مکانیزم واکنش..... ۲۷
- ۱-۳-۲. آنالیز حساسیت..... ۲۷
- ۲-۳-۲. آنالیز جریان واکنش..... ۲۹

فصل سوم: روش حل و آشنایی با CHEMKIN

- ۱-۳. روش حل..... ۳۲
- ۲-۳. اجرای OPPDIF..... ۳۳
- ۱-۲-۳. عملگر شبکه‌ی مجدد..... ۳۴
- ۲-۲-۳. ورودی..... ۳۶
- ۳-۲-۳. کلمات کلیدی..... ۳۷
- ۴-۲-۳. پردازش نهایی..... ۴۳
- ۳-۳. نرم‌افزار CHEMKIN..... ۴۴

فصل چهارم: نتایج

- ۴-۱. بررسی اعتبار نتایج..... ۵۱
- ۴-۲. نتایج شبیه سازی شعله‌ی نفوذی جریان مخالف گاز طبیعی..... ۵۲
- ۴-۳. نتایج رقیق سازی با CO_2 ۵۸
- ۴-۳-۱. اثر رقیق‌ساز CO_2 بر دما..... ۵۸
- ۴-۳-۲. اثر رقیق‌ساز CO_2 بر تولید گونه‌های C_2H_2 ، NO_2 و NO ۶۰
- ۴-۳-۳. اثر فشار بر دمای ماکزیمم در حضور رقیق‌ساز CO_2 ۶۱
- ۴-۳-۴. اثر دمای اکسیدکننده و سوخت بر دمای ماکزیمم در حضور رقیق‌ساز CO_2 ۶۳
- ۴-۳-۵. اثر نرخ کرنش بر دمای ماکزیمم و تولید گونه‌های C_2H_2 ، NO_2 و NO در حضور رقیق‌ساز CO_2 ۶۴
- ۴-۴. نتایج رقیق سازی با آب..... ۶۶
- ۴-۴-۱. اثر رقیق‌ساز آب بر دما..... ۶۷
- ۴-۴-۲. اثر رقیق‌ساز آب بر تولید گونه‌های C_2H_2 ، NO_2 و NO ۶۸
- ۴-۴-۳. اثر فشار بر دمای ماکزیمم در حضور رقیق‌ساز آب..... ۶۸
- ۴-۴-۴. اثر دمای اکسیدکننده و سوخت بر دمای ماکزیمم در حضور رقیق‌ساز آب..... ۷۰
- ۴-۴-۵. اثر نرخ کرنش بر دمای ماکزیمم و تولید گونه‌های C_2H_2 ، NO_2 و NO در حضور رقیق‌ساز آب..... ۷۱
- ۴-۵. مقایسه‌ی نتایج رقیق‌سازهای CO_2 و آب..... ۷۳
- ۴-۵-۱. اثر رقیق‌ساز بر دما..... ۷۳
- ۴-۵-۲. اثر رقیق‌ساز بر تولید گونه‌های C_2H_2 ، NO_2 و NO ۷۳
- ۴-۵-۳. اثر فشار بر دمای ماکزیمم در حضور رقیق‌ساز..... ۷۵
- ۴-۵-۴. اثر نرخ کرنش بر دمای ماکزیمم و تولید گونه‌های C_2H_2 ، NO_2 و NO در حضور رقیق‌ساز..... ۷۵
- ۴-۶. آنالیز مسیر واکنش احتراق گاز طبیعی در مدل جریان مخالف نفوذی..... ۷۷

فصل پنجم: جمع‌بندی و ارائه‌ی پیشنهادات

۱-۵. جمع‌بندی..... ۸۶

۲-۵. ارائه‌ی پیشنهادات..... ۸۷

ضمائم

ضمیمه الف: معرفی گاز طبیعی، دوده و اکسیدهای ازت (NO_x)..... ۹۰

الف-۱. گاز طبیعی..... ۹۰

الف-۱-۱. تاریخچه..... ۹۰

الف-۱-۲. ترکیبات گاز طبیعی..... ۹۰

الف-۱-۳. چگالی گاز طبیعی..... ۹۱

الف-۱-۴. سوختن گاز طبیعی..... ۹۲

الف-۱-۵. ارزش حرارتی گاز طبیعی..... ۹۲

الف-۱-۶. دلایل مطلوبیت گاز طبیعی..... ۹۲

الف-۱-۷. مصرف گاز طبیعی..... ۹۳

الف-۱-۸. قابلیت اشتعال گاز طبیعی..... ۹۴

الف-۲. دوده..... ۹۴

الف-۳. اکسیدهای ازت (NO_x)..... ۹۶

الف-۳-۱. NO حرارتی (مکانیزم زلدوویچ)..... ۹۶

الف-۳-۲. تولید NO از طریق منوکسیددی‌نیتروژن..... ۹۷

الف-۳-۳. NO سریع (مکانیزم فنیمور)..... ۹۷

الف-۳-۴. مکانیزم بوزلی و دین..... ۹۸

ضمیمه ب: مکانیزم سنتیک شیمیایی GRI3.0..... ۹۹

مراجع..... ۱۰۹

چکیده انگلیسی..... ۱۱۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱. شعله و انواع آن:

در فرایندهای احتراق، سوخت و اکسیدکننده مخلوط شده و با تشکیل شعله می‌سوزند. شعله‌ها را بطور کلی می‌توان به دو دسته تقسیم بندی کرد: در دسته‌ی اول سوخت و اکسیدکننده ابتدا مخلوط شده و سپس می‌سوزند (پیش آمیخته) و در دسته‌ی دوم احتراق و مخلوط شدن همزمان رخ می‌دهد (غیر پیش آمیخته) طبقه بندی می‌شوند. سپس هر یک از این دو، به دو دسته‌ی آرام و مغشوش تقسیم می‌شوند. جدول (۱-۱) مثال‌هایی را از سیستم‌های احتراقی که متعلق به هر یک از طبقات می‌باشند، نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱. مثال‌هایی برای سیستم‌های احتراقی در طبقه بندی آنها

| ترکیب سوخت/اکسیدکننده | حرکت سیال | مثال‌ها |
|-----------------------|----------------|---------------------------------------------------------|
| شعله | غیر پیش آمیخته | آرام } در احتراق چوب در شعله‌ی جریان مخالف |
| | | مغشوش } در توربین هواپیما در موتور دیزل |
| | پیش آمیخته | آرام } در شعله‌ی تخت در شعله‌ی بنسن |
| | | مغشوش } در موتور بنزینی اشتعال جرقه‌ای در توربین گاز |

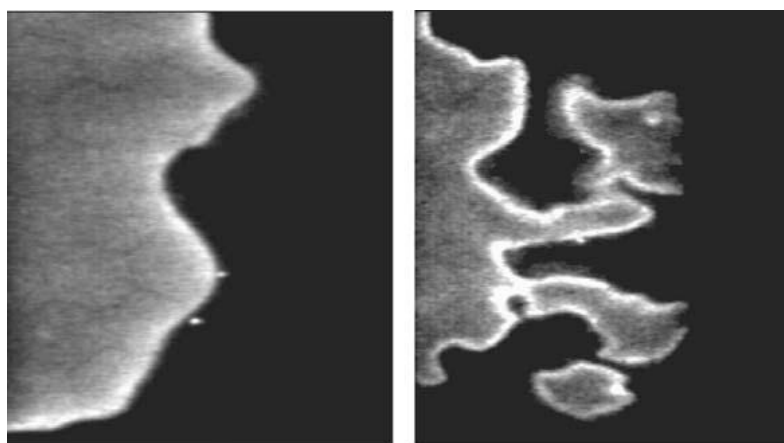
معیار آرام و مغشوش بودن در اینجا با آنچه که در علم سیالات بحث می‌شود، متفاوت است. معیار آرام و مغشوش بودن در احتراق کیفی بوده و به شکل ظاهری جبهه‌ی شعله بستگی دارد. در حالت مغشوش جبهه‌ی شعله دارای خمیدگی و چین و چروک‌های زیادی است، اما در حالت آرام جبهه‌ی شعله خمیدگی و چین و چروک زیادی ندارد (شکل ۱-۱ را ببینید).

۱-۱-۱. شعله‌های پیش آمیخته‌ی آرام

در شعله‌های پیش آمیخته‌ی آرام، سوخت و اکسیدکننده پیش از احتراق مخلوط می‌شوند و شکل شعله آرام است.

۱-۱-۲. شعله‌های پیش آمیخته‌ی مغشوش

در شعله‌های پیش آمیخته مغشوش، سوخت و اکسیدکننده پیش از احتراق مخلوط می‌شوند و شکل شعله مغشوش و دارای چین و چروک است. در این حالت جبهه‌ی شعله‌های پیش آمیخته به داخل جریان سیال نسوخته انتشار پیدا می‌کند.



شکل ۱-۱. جبهه‌ی شعله‌ی آرام (سمت چپ) و جبهه‌ی شعله‌ی مغشوش (سمت راست)

امتیاز شعله‌ی پیش آمیخته نسبت به غیر پیش آمیخته این است که امکان کنترل آن بیشتر است. چرا که پیش آمیختگی در شرایط سوخت رقیق از ایجاد دماهای بالا جلوگیری کرده و در نتیجه میزان تولید NO در اثر احتراق کم می‌شود. به علاوه در این شرایط فقط مقدار کمی دوده تشکیل می‌شود، زیرا دوده بیشتر محصول یک احتراق با سوخت غنی است. علی‌رغم این امتیازات، به علت امکان تجمع تصادفی حجم‌های زیادی از واکنش دهنده‌های پیش آمیخته که می‌توانند یک انفجار غیر قابل کنترل ناخواسته را ایجاد کنند، احتراق پیش آمیخته به طور گسترده در صنعت استفاده نمی‌شود.

۱-۱-۳. شعله‌های غیر پیش آمیخته‌ی (نفوذی) آرام

در شعله‌های غیر پیش آمیخته‌ی آرام (یا شعله‌های پخشی آرام)، سوخت و اکسیدکننده در خلال فرایند احتراق، مخلوط می‌شوند و شکل شعله آرام است.

۱-۱-۴. شعله‌های غیر پیش آمیخته‌ی (نفوذی) مغشوش

در این حالت نیز سوخت و اکسیدکننده در خلال فرایند احتراق، مخلوط می‌شوند ولی شکل شعله مغشوش است.

شیمی شعله‌های غیر پیش آمیخته پیچیده‌تر از شعله‌های پیش آمیخته است، زیرا نسبت هم‌ارزی ϕ (که معیاری از غنی یا رقیق بودن مخلوط سوخت و اکسیدکننده است)، تمام گستره‌ی صفر (اکسیدکننده‌ی خالص) تا بینهایت (سوخت خالص) را در برمی‌گیرد. احتراق با سوخت غنی در طرف سوخت و احتراق با سوخت رقیق در طرف اکسیدکننده رخ می‌دهد. برخلاف شعله‌های پیش آمیخته، شعله‌های غیر پیش آمیخته منتشر نمی‌شوند. شعله‌های غیر پیش آمیخته بیشتر در کوره‌ها و مشعل‌های صنعتی استفاده می‌شود. شعله‌های غیر پیش آمیخته روشنایی زرد رنگی دارند که بوسیله‌ی سوختن ذرات دوده در وضعیت با سوخت غنی ایجاد می‌شود. بنابراین شعله‌های غیر پیش آمیخته (نفوذی)، در احتراق، با شعله‌های پیش‌آمیخته متفاوت هستند زیرا احتراق در سطح بین سوخت و اکسیدکننده اتفاق می‌افتد و فرایند سوختن بیشتر به نرخ نفوذ سوخت و اکسیدکننده بستگی دارد تا نرخ واکنش‌های شیمیایی. به همین دلیل، آیرودینامیک جریان یک فاکتور مهم در رفتار شعله‌ی نفوذی است. مشکل اصلی شعله‌های نفوذی این است که آنها منتشر نمی‌شوند و بنابراین ویژگی‌های اساسی آنها مانند سرعت شعله بسادگی شعله‌های پیش‌آمیخته محاسبه نمی‌گردد. مطالعه‌ی شعله‌های نفوذی جریان مخالف آرام مدل ساده‌ای را برای درک صحیح ویژگی‌های مختلف احتراق و ساختار شعله فراهم می‌کند.

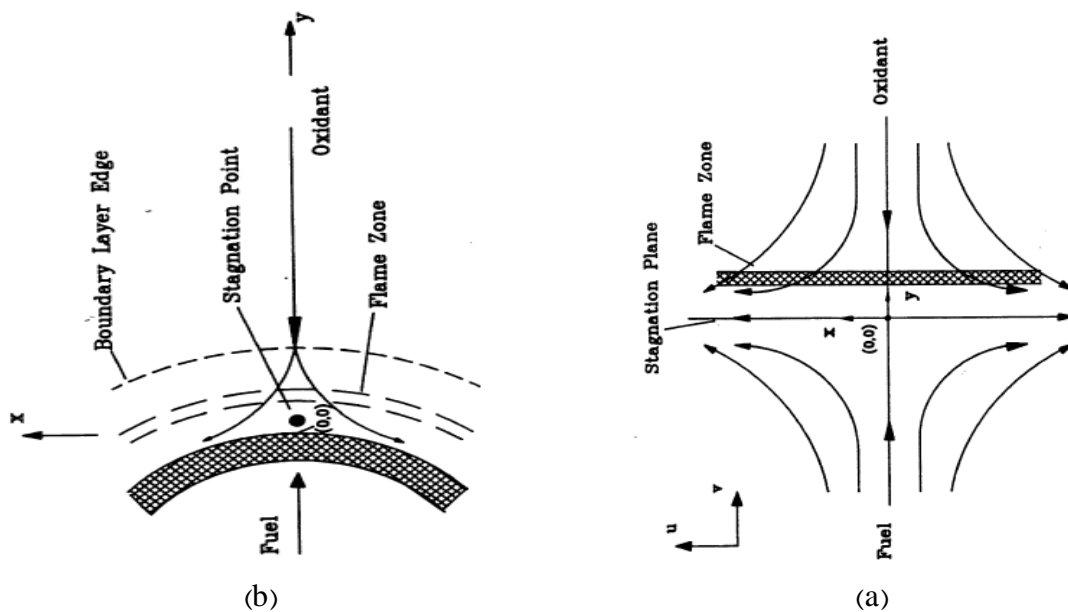
شعله‌های نفوذی جریان مخالف آرام به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱. شعله‌های نفوذی تشکیل شده بوسیله‌ی جت‌های سوخت و اکسیدکننده که در دو جهت مخالف حرکت می‌کنند (شکل ۲-۱-a). در این حالت صفحه‌ی تخت شعله عمود بر محور نازل است. به علت سرعت متغیر در دهانه‌ی مشعل و سایر تاثیرات فرعی، اغلب شعله‌ها صاف (تخت) نیستند و فرض می‌شود که حلقه‌ی تختی از شعله داریم.

۲. شعله‌ی نفوذی که در آن سوخت گازی از یک مشعل خلل و فرج‌دار به داخل یک جریان اکسیدکننده‌ی پیش‌رونده دمیده می‌شود (شکل ۲-۱-b).

۲-۱. مروری بر تحقیقات انجام شده:

مطالعات بسیاری روی تئوری شعله‌های نفوذی صورت گرفته است. در ابتدا هدف، محاسبه‌ی شکل و مخصوصاً طول شعله‌های ایجاد شده از جت‌های گازی سوخت خارج شده به محیط هوای ساکن بود. اصول اولیه‌ی این



شکل ۱-۲. شماتیک هندسه‌ی شعله‌ی نفوذی جریان مخالف. (a) جت‌های جریان مخالف سوخت و اکسیدکننده (b) مشعل خلل و

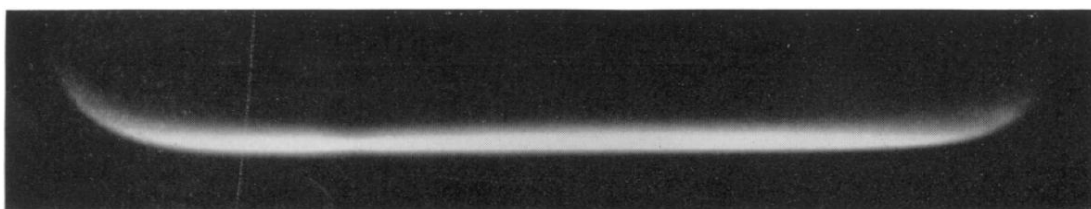
فرج دار و جت اکسیدکننده

تئوری توسط بورک و شومان [۱] و سپس بوسیله‌ی وهل، گزلی و کپ [۲]، هاتل و هاوتورن [۳]، فای [۴] ارائه شد.

فرضیات اصلی در این تئوری عبارتند از:

- شعله در طول یک سطح اتفاق می‌افتد و در حالت استوکیومتریکی قرار دارد.
- بدلیل نازک بودن ناحیه‌ی واکنش شدت مصرف واکنش دهنده‌ها در آن خیلی سریعتر از شدت فراهم شدن آنها بوسیله‌ی نفوذ است.
- در این مدل از تشعشع در ناحیه‌ی شعله نیز چشم پوشی می‌شود.

اولین شعله‌ی نفوذی تخت بوسیله‌ی پارکر و ولفهارد [۵] توسعه یافت و مطالعات آزمایشگاهی توسط افرادی مانند اسمیت، گوردون و هانت [۶] و بارنارد و کالیس [۷] انجام شد. پاندینا و وینبرگ [۸] ساختار شعله‌ی نفوذی تخت، پایداری و توزیع سرعت جریان را اندازه‌گیری کردند (شکل‌های ۱-۳ و ۱-۴).



شکل ۱-۳. تصویر شعله‌ی تخت نفوذی [۸]