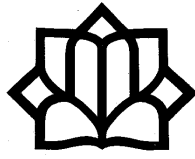


مِنْ



دانشگاه کاشان
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

شبیه سازی عددی و مطالعه احتراق پیش آمیخته در مشعل ترکیبی متخلخل – شعله آزاد

استاد راهنما:

دکتر سید عبدالمهدی هاشمی

استاد مشاور:

دکتر مصطفی خسروی الحسینی

به وسیله:

مجید نیکفر

بهمن ماه ۱۳۹۰



دانشگاه کاشان
دانشکده مهندسی

بسمه تعالی

تاریخ:
شماره:
پیوست:

مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی دانشجو: مجید نیکفر	شماره دانشجویی: ۸۸۱۳۵۳۶۰۱۵
رشته: مهندسی مکانیک	دانشکده: مهندسی
عنوان پایان نامه: شبیه سازی عددی و مطالعه احتراق پیش آمیخته در مشعل ترکیبی متخلخل-شعله آزاد	
تعداد واحد پایان نامه: ۶ واحد	تاریخ دفاع: ۹۰/۱۱/۸

این پایان نامه به مدیریت تحصیلات تکمیلی به منظور بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد ارائه می گردد. دفاع از پایان نامه در تاریخ ۹۰/۱۱/۸ مورد تأیید و ارزیابی هیات داوران قرار گرفت و با نمره ۲۰ (بیست) و درجه عالی به تصویب رسید.

اعضای هیات داوران

عنوان	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱. استاد راهنما	دکتر سید عبدالمهدی هاشمی	استادیار	
۲. استاد مشاور	دکتر مصطفی خسروی الحسینی	استادیار	
۲. متخصص و صاحب نظر از داخل دانشگاه	دکتر علی اکبر عباسیان	استادیار	
۳. متخصص و صاحب نظر از داخل دانشگاه	دکتر قنبر علی شیخ زاده	دانشیار	
۴. نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دکتر حسین ایمانیان	استادیار	

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه
دکتر ابراهیم نعمتی لای

آدرس: کاشان- پلوار قطب رواندی

کد پستی: ۵۱۱۶۷-۸۷۳۱۷

تلفن: ۵۵۵۹۹۳۰-۵۵۵۹۹۳۰ و درنگار: ۵۵۵۹۹۳۰

http://www.kashanu.ac.ir

تشکر و قدردانی

از پدر گر قالب تن یافتم از معلم جان روشن یافتم

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت به ما عطا فرمود. در اینجا برخود لازم میدانم از زحمات تمامی اساتید بزرگوار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده‌اند، تشکر نمایم.

از استاد گرامی و بزرگوار جناب آقای دکتر سید عبدالمهدی هاشمی که راهنمایی اینجانب در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان‌نامه را تقبل نموده‌اند نهایت قدردانی و سپاسگزاری را دارم. این پروژه با حمایت مالی پژوهشگاه صنعت نفت ایران انجام شده است. لذا از استاد راهنمای خود به علت ایجاد زمینه کسب این حمایت و همچنین فراهم کردن امکانات فیزیکی لازم برای انجام این تحقیق، تشکر ویژه‌ای دارم.

از حضور محترم آقای دکتر مصطفی خسروی الحسینی از پژوهشگاه صنعت نفت ایران بعنوان مشاور که با راهنمایی‌های خود مرا مورد لطف قرار داده‌اند کمال تشکر را دارم.

همچنین از تشریک مساعی آقای دکتر قنبرعلی شیخزاده و آقای دکتر علی اکبر عباسیان بعنوان اساتید داور که این پایان‌نامه را مورد مطالعه قرار داده و در جلسه دفاعیه شرکت نموده‌اند تشکر و تقدیر می‌نمایم. از نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه جناب آقای دکتر حسین ایمانیان که قبول زحمت نموده‌اند نیز سپاسگزاری می‌نمایم.

تقدیم به دست‌های زحمتکش پدرم و محبت‌های بی دریغ مادرم؛
و همچنین تقدیم به همسرم که با کمک‌های خود مرا در راه تالیف این
مجموعه یاری داد.

چکیده:

در این تحقیق، احتراق پیش آمیخته در مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد، در یک محفظه متقارن محوری شبیه سازی عددی و مطالعه شده است. معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی و جزءها با استفاده از روش عددی حجم محدود حل شده‌اند. در این شبیه سازی از مکانیزم احتراقی چند مرحله‌ای کاهش یافته و مدل آشفستگی $k-\epsilon$ تحقیق پذیر استفاده شده است.

به منظور اعتبار سنجی نتایج عددی، نمونه‌ای آزمایشگاهی از این مشعل ساخته شده و مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج عددی و داده‌های تجربی مطابقت خوبی با هم دارند. در این مطالعه ابتدا مکانیزم احتراق در محیط ترکیبی متخلخل - شعله آزاد تشریح شده است. سپس به مقایسه مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل پرداخته شده است. اثر پارامترهایی مانند نسبت هم‌ارزی، چگالی حفره محیط متخلخل، پیش‌گرمایش مخلوط ورودی و شرایط حرارتی دیواره محفظه بر بیشینه توان حرارتی مشعل ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته و در مورد اثر هریک از پارامترهای فوق بر تولید آلاینده NO_x نمونه‌ای ارائه شده است. نتایج نشان داده است استفاده از مشعل ترکیبی متخلخل شعله - آزاد توان حرارتی را نسبت به مشعل تمام متخلخل افزایش و تولید آلاینده NO را کاهش می‌دهد. همچنین مشاهده شده است که افزایش چگالی حفره در یک تخلخل ثابت، توان حرارتی مشعل را افزایش می‌دهد. نتایج نشان داده است که با افزایش هوای اضافی و همچنین کاهش هوای استوکیومتری، محدوده توان حرارتی مشعل کاهش می‌یابد و بیشینه توان حرارتی با شعله پایدار در مخلوط رقیق سوخت و هوا (نسبت هم‌ارزی ۰/۹) بدست می‌آید. مشاهده شده است که پیش‌گرمایش مخلوط ورودی، محدوده توان حرارتی مشعل را افزایش می‌دهد. همچنین با ایجاد انتقال حرارت از دیواره محفظه، حدود پایداری شعله در نرخ آتش‌های پایین افزایش و در نرخ آتش‌های بالا کاهش می‌یابد و تولید آلاینده NO را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت مخلوط ورودی، شعله مدفون به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند.

کلمات کلیدی: احتراق - مشعل ترکیبی - محیط متخلخل - شعله آزاد - پایداری شعله - توان

حرارتی - تولید NO_x

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱ مقدمه
۱-۱-۱	پیشگفتار.....
۲-۱	انتقال حرارت و احتراق در محیط متخلخل.....
۳-۱	کاربردهای مشعل‌های متخلخل.....
۴-۱	خواص و ساختار مواد در مشعل متخلخل.....
۵-۱	بیان مفاهیم مرتبط با مشعل‌های متخلخل.....
۵-۱-۱	تخلخل و چگالی حفره.....
۵-۱-۲	استوکیومتری، نسبت هم‌ارزی و دمای آدیاباتیک.....
۵-۱-۳	نرخ آتش (توان حرارتی).....
۵-۱-۴	سرعت شعله.....
۵-۱-۶	پایداری شعله.....
۵-۱-۷	مروری بر مطالعات انجام شده در مورد احتراق در محیط متخلخل.....
۵-۱-۷-۱	تحقیقات آزمایشگاهی.....
۵-۱-۷-۲	تحقیقات تئوری.....
۵-۱-۷-۱-۱	تقسیم بندی مدل‌های ارائه شده برای احتراق در محیط متخلخل.....
۵-۱-۷-۲-۱	مروری بر تحقیقات عددی انجام شده.....
۵-۱-۷-۳-۱	مشعل نانو استار.....
۵-۱-۸-۱	تحقیق حاضر.....
۵-۱-۸-۱-۱	نوآوری.....
۵-۱-۸-۲-۱	اهداف.....
۵-۱-۸-۳-۱	روش انجام مطالعه و مروری بر فصل‌های تحقیق حاضر.....
۲۷	فصل ۲ ساخت نمونه مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد
۱-۲-۱	مقدمه.....
۲-۲-۱	ساختار مشعل.....
۳-۲-۱	اجزای مشعل.....
۱-۳-۲-۱	محیط‌های متخلخل.....
۲-۳-۲-۱	نگهدارنده ی محیط متخلخل.....
۴-۲-۱	اندازه گیری دما.....
۱-۴-۲-۱	ترموکوپل‌ها.....
۲-۴-۲-۱	ثبت دما.....
۵-۲-۱	اندازه گیری دبی گاز و هوا.....

۳۴	۶-۲- پیش مخلوط.....
۳۴	۷-۲- سیستم تأمین هوا.....
۳۶	۸-۲- آزمون های انجام شده.....
۳۸	۲-۸-۲- عدم قطعیت.....
۳۹	۳-۸-۲- تکرارپذیری.....
۴۰	۹-۲- جمع بندی و نتیجه گیری.....

فصل ۳ معادلات حاکم

۴۱	
۴۲	۱-۳- مقدمه.....
۴۲	۲-۳- فرضیات.....
۴۳	۳-۳- شکل کلی معادلات.....
۴۴	۴-۳- معادلات با فرض عدم تعادل حرارتی فاز جامد و گاز و تشعشع محیط متخلخل.....
۴۵	۵-۳- مکانیزم های شیمیایی.....
۴۷	۶-۳- مدل و رژیم احتراقی حاکم.....
۴۸	۷-۳- مدل سازی آشفته‌گی جریان.....
۴۹	۱-۷-۳- مدل های ادی ویسکوزیته.....
۴۹	۲-۷-۳- مدل آشفته‌گی مورد استفاده در این تحقیق.....
۵۱	۸-۳- تحلیل عددی انتقال حرارت تابشی.....
۵۲	۱-۸-۳- مدل سازی تابش.....
۵۴	۲-۸-۳- ضخامت نوری.....
۵۵	۳-۸-۳- مدل تابشی مورد استفاده در تحقیق حاضر.....
۵۵	۱-۳-۸-۳- مزایای مدل تابشی جهات مجزا.....
۵۵	۲-۳-۸-۳- محدودیت های مدل تابشی جهات مجزا.....
۵۶	۳-۳-۸-۳- معادلات مدل تابشی جهات مجزا.....
۵۶	۹-۳- مدل سازی آلاینده اکسیدهای نیتروژن.....
۵۷	۱-۹-۳- اکسید نیتروژن حرارتی.....
۵۸	۲-۹-۳- اکسید نیتروژن فوری.....
۵۹	۳-۹-۳- اکسید نیتروژن سوخت.....

فصل ۴ هندسه، روش عددی، استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی

۶۰	
۶۱	۱-۴- مقدمه.....
۶۱	۲-۴- هندسه و شرایط مرزی.....
۶۳	۳-۴- الگوریتم حل و مدل های مورد استفاده.....
۶۴	۴-۴- استقلال حل از شبکه.....
۶۵	۵-۴- اعتبارسنجی حل عددی با نتایج تجربی.....
۶۷	۶-۴- جمع بندی و نتیجه گیری.....

فصل ۵ نتایج

۶۸

- ۱-۵- مقدمه ۶۹
- ۲-۵- بررسی احتراق در مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد ۶۹
- ۳-۵- موقعیت شعله ۷۲
- ۴-۵- مقایسه مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد با مشعل متخلخل ۷۶
- ۵-۵- بررسی عوامل موثر بر عملکرد مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد ۷۹
- ۱-۵-۵- بررسی اثر چگالی حفره محیط متخلخل ۷۹
- ۲-۵-۵- بررسی اثر نسبت هم ارزی ۸۲
- ۳-۵-۵- بررسی اثر پیش گرمایش مخلوط سوخت و هوای ورودی ۸۶
- ۴-۵-۵- بررسی اثر دمای دیواره محفظه احتراق ۸۹
- ۶-۵- جمع بندی ۹۲

فصل ۶ نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات برای ادامه کار

۹۳

- ۱-۶- مقدمه ۹۴
- ۲-۶- نتایج ۹۴
- ۳-۶- ارائه پیشنهادات برای ادامه کار ۹۶

فهرست مراجع

۹۸

پیوست

۱۰۳

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱. مهمترین خواص SiC، Al ₂ O ₃ و ZrO ₂ [3].....	۶
جدول ۱-۲. سرعت شعله برحسب نسبت هم‌ارزی برای مخلوط هوا-متان [۱۱].....	۱۱
جدول ۳-۱. مقادیر ثابت مدل استاندارد k-ε [۸۱].....	۵۰
جدول ۳-۲. مقادیر ثابت مدل تحقق‌پذیر k-ε [۸۲].....	۵۱
جدول ۴-۱. جزء جرمی اجزای ورودی در نسبت هم‌ارزی ۰/۹.....	۶۲
جدول ۴-۲. بررسی استقلال حل از شبکه.....	۶۵
جدول ۴-۳. دمای محصولات در خروجی محفظه بر روی خط محور (موقعیت ترموکوپل T5).....	۶۷

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱. نمونه‌هایی از کاربرد مشعل متخلخل در الف) گرمایش محیط ب). صنعت پخت نان پ) بویلر و توربین [۱].....	۵
شکل ۱-۲. مشعل‌های متخلخل سرامیکی مختلف الف) ساختار فیبری Al_2O_3 ، ب) ساختار C-SiC (سیلیکون کرباید با پوشش کربن)، ج) شبکه سیمی از جنس آلیاژی Al-Fe-Cr، د) ساختار پایدارشده‌ی ZrO_2 [۱].....	۶
شکل ۱-۳. ساختار متخلخل از جنس Al_2O_3 دانه‌ای الف) رینگی، ب) کروی [1].....	۷
شکل ۱-۴. بردارهای سرعت در مخروط بونسن [۱۱].....	۱۱
شکل ۱-۵. پروفیل درجه حرارت خط مرکزی مشعل متخلخل [۵۶].....	۲۲
شکل ۱-۶. الف) شکل شماتیک و ب) نمونه احتراق در مشعل نانو استار [۷۱ و ۷۲].	۲۵
شکل ۲-۱. طرح‌واره و پایه نگه‌دارنده مشعل مورد استفاده.....	۲۹
شکل ۲-۲. طرح‌واره‌ی دستگاه آزمایش.....	۲۹
شکل ۲-۳. سرامیک SiC الف) محیط متخلخل-شعله آزاد ب) محیط تمام متخلخل	۳۰
شکل ۲-۴. نگه‌دارنده‌ی سرامیکی.....	۳۱
شکل ۲-۵. محل قرارگیری ترموکوپل‌ها در آزمون تجربی الف) مشعل تمام متخلخل و ب) مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد.....	۳۲
شکل ۲-۶. روتامتر بکار رفته برای الف) گاز و ب) هوا.....	۳۳
شکل ۲-۷. پیش‌مخلوط‌کن سوخت و هوا در دستگاه آزمایش.....	۳۵
شکل ۲-۸. الف) کمپرسور هوا، ب) تنظیم‌کننده‌ی فشار، پ) رطوبت‌گیر.....	۳۶
شکل ۲-۹. نصب روتامترها، رگلاتور و رطوبت‌گیر بر روی مورد.....	۳۶
شکل ۲-۱۰. نمایی از احتراق در الف) مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد ب) مشعل متخلخل.....	۳۷
شکل ۲-۱۱. دمای جانبی محیط متخلخل در مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد و مشعل تمام متخلخل.....	۳۸
شکل ۲-۱۲. نمودار دمای جانبی مشعل ترکیبی متخلخل - شعله آزاد در سه تکرار	۳۹

- شکل ۳-۱. مؤلفه‌های مختلف انتقال حرارت تابشی در یک محیط گازی [۷۳]..... ۵۳
- شکل ۴-۱. هندسه و شرایط مرزی مورد استفاده در مدلسازی عددی ۶۱
- شکل ۴-۲. شبکه بندی هندسه مورد بررسی ۶۴
- شکل ۴-۳. توزیع دما در مقطع خروجی محیط متخلخل و شعله آزاد ($X=0.062\text{ m}$) ۶۶
- در تعداد نقاط مختلف شبکه..... ۶۵
- شکل ۴-۴. مقایسه پروفیل دمای جانبی محیط متخلخل در مدل سازی عددی و تجربی در الف) مشعل تمام متخلخل و ب) مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد..... ۶۶
- شکل ۵-۱. خطوط فشار نسبی ثابت در مشعل ترکیبی متخلخل شعله آزاد بر حسب پاسکال ۷۱
- شکل ۵-۲. پروفیل اندازه سرعت، سرعت ورودی 0.4 m/s ۷۱
- شکل ۵-۳. کسر جرمی رادیکال های الف) O ب) H ج) OH ۷۲
- شکل ۵-۴. خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد..... ۷۳
- شکل ۵-۵. خطوط آنتالپی محسوس ثابت داخل محفظه احتراق مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد..... ۷۳
- شکل ۵-۶. خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق مشعل ترکیبی متخلخل- شعله آزاد با $\lambda = 8\text{ ppc}$ و $\phi = 0.9$ در سرعتهای الف) 0.2 m/s ب) 0.3 m/s ج) 1 m/s د) $1/5\text{ m/s}$ ه) $1/6\text{ m/s}$ ۷۵
- شکل ۵-۷. منحنی دما بر حسب موقعیت محوری در محفظه احتراق در موقعیت شعاعی $R=0.5$ و در $\phi = 0.9$ و $\lambda = 8\text{ ppc}$ الف) شکل اصلی ب) تصویر بزرگنمایی شده ۷۵
- شکل ۵-۸. خطوط هم دما بر حسب کلوین الف) با در نظر گرفتن تابش گاز و دیواره ها ب) با فرض عدم تابش گاز و دیواره ها ۷۶
- شکل ۵-۹. خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق مشعل تمام متخلخل با $\lambda = 8\text{ ppc}$ و $\phi = 0.9$ در سرعتهای الف) 0.3 m/s ب) 0.4 m/s ج) 1 m/s د) $1/1\text{ m/s}$ ۷۷

- شکل ۵-۱۰.** تولید آلاینده NO بر حسب سرعت مخلوط ورودی و نرخ آتش در $\phi = 0.9$ و $\lambda = 8$ ppc ۷۸
- شکل ۵-۱۱.** خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق با $\lambda = 4$ ppc و $\phi = 0.9$ در $\phi = 0.9$ در سرعتهای الف) 0.3 m/s (ب) 0.4 m/s (ج) 1 m/s (د) 1.2 m/s (ه) 1.3 m/s ۸۰
- شکل ۵-۱۲.** خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق با چگالی حفره ppc $\lambda = 16$ و $\phi = 0.9$ در سرعتهای الف) 0.7 m/s (ب) 0.8 m/s (ج) 1 m/s (د) 2 m/s (ه) $2/7$ m/s (ز) $2/7$ m/s ۸۰
- شکل ۵-۱۳.** منحنی مکان شعله بر حسب سرعت مخلوط ورودی برای چگالی حفره های مختلف در $\phi = 0.9$ ۸۱
- شکل ۵-۱۴.** حدود پایداری شعله بر حسب چگالی حفره های مختلف در $\phi = 0.9$ ۸۲
- شکل ۵-۱۵.** میزان تولید آلاینده NO بر حسب چگالی حفره در $FR = 2900$ kW/m² و $\phi = 0.9$ ۸۲
- شکل ۵-۱۶.** خطوط هم دما را برای مشعل ترکیبی در نسبت هم آرزوی 0.6 تا $1/1$ و برای $\lambda = 8$ ppc ۸۳
- شکل ۵-۱۷.** حدود پایداری بر حسب نسبت هم آرزوی برای مشعل ترکیبی با $\lambda = 8$ ppc ۸۵
- شکل ۵-۱۸.** حدود پایداری شعله برای یک مشعل دو لایه ای متخلخل در مرجع [۵۸] ۸۵
- شکل ۵-۱۹.** آلاینده NO بر حسب نسبت هم آرزوی در $FR = 1155$ kW/m² و $\lambda = 8$ ppc ۸۵
- شکل ۵-۲۰.** خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق با دمای مخلوط ورودی 450 K در $\phi = 0.9$ و $\lambda = 8$ ppc و در سرعت های مخلوط ورودی الف) 0.3 m/s (ب) 0.4 m/s (ج) $1/7$ m/s (د) $1/8$ m/s ۸۶
- شکل ۵-۲۱.** خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق با دمای مخلوط ورودی 600 K در $\phi = 0.9$ و $\lambda = 8$ ppc و در سرعت های الف) 0.5 m/s (ب) 0.6 m/s (ج) $2/6$ m/s (د) $2/7$ m/s ۸۷

شکل ۵-۲۲. منحنی محدوده توان حرارتی پایدار بر حسب دمای مخلوط ورودی در

۸۸ $\phi = 0.9$ و $\lambda = 8$ ppc

شکل ۵-۲۳. منحنی تولید آلاینده NO بر حسب دمای مخلوط ورودی در شرایط m/s

۸۸ $\phi = 0.9$ و $\lambda = 8$ ppc، $V_{in} = 1/5$

شکل ۵-۲۴. خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق با شرایط دمای

دیواره ۳۰۰K با $\lambda = 8$ ppc و $\phi = 0.9$ در سرعت های الف) ۰/۱ m/s ب) ۰/۲ m/s ج)

۹۰ ۱/۳ m/s (د) ۱/۲ m/s

شکل ۵-۲۵. خطوط هم دما بر حسب کلوین داخل محفظه احتراق با شرایط دمای

دیواره ۳۰۰K با $\lambda = 4$ ppc و $\phi = 0.9$ در سرعت های الف) ۰/۱ m/s ب) ۰/۲ m/s ج)

۹۰ ۱/۲ m/s (د) ۱/۱ m/s

شکل ۵-۲۶. حدود پایداری شعله بر حسب چگالی حفره برای شرایط دمایی مختلف

۹۱ $\phi = 0.9$

شکل ۵-۲۷. منحنی تولید آلاینده NO برای شرایط مختلف حرارتی دیواره محفظه ۹۱

فهرست علائم و اختصارات

ρ	چگالی (kg/m^3)	LHV	ارزش حرارتی پایین (kJ/m^3)
η	راندمان	NOx	اکسید نیتروژن
ε	ضریب صدور یا تخلخل	ppc	حفره در سانتی متر
ϕ	نسبت هم‌ارزی	ppi	حفره در اینچ
	زیر نویس‌ها	\dot{V}	دبی حجمی (m^3/s)
L	آرام	T	دما ($^{\circ}\text{C}$)
i	اشتعال	A	سطح مقطع مشعل (m^2)
stoic	استوکیومتری	u	سرعت جریان (cm/s)
rad	تابشی	V_{in}	سرعت مخلوط ورودی
N	تعداد متغیرهای مستقل	S	سرعت شعله (cm/s)
F	جریان	R	شعاع
p	حفره	K	ضریب انتقال حرارت هدایتی (W/mK)
out	خروجی	c_p	ظرفیت حرارتی ویژه (J/kgK)
surf	سطح	Pe	عدد پکلت (Péclet)
f	سوخت یا نهایی	d	قطر (m)
m	متوسط	FAR	نسبت (مولی یا جرمی) سوخت به هوا
eff	مؤثر	FR	نرخ آتش (kW/m^2)
mix	مخلوط	\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت (kW)
surr	محیط اطراف	RR	نرخ واکنش
u	نهایی		علائم یونانی
a	هوا	α	پراکندگی گرمایی یا زاویه‌ی شعله
in	ورودی	σ	ثابت استفان - بولتزمن ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

((أَفْرَأَيْتُمُ النَّارَ الَّتِي تُورُونَ * ءَأَنْتُمْ أَنْشَأْتُمْ شَجَرَتَهَا أَمْ نَحْنُ الْمُنشِئُونَ))^۱

آتش یکی از شگفت انگیزترین نعمت‌ها و نمونه‌ای از ظهور تنها وجود هستی است. امید است که با رشد تکنولوژی انسان خود را خالق آن نداند هر چند که خوشبختانه بشر حاضر می‌فهمد که نه تنها سردی آتش بر ابراهیم، بلکه سوزاندگی آن نیز معجزه است.

احتراق یکی از قدیمی‌ترین تکنولوژی‌های بشر است. در حال حاضر در حدود ۹۰ درصد انرژی جهان از سوختن سوخت‌های فسیلی است. لذا افزایش تقاضا و کاهش ذخیره سوخت فسیلی و همچنین کاهش سطح آلودگی‌ها نیاز به بهبودی بیشتر در سیستم‌های احتراق را امری غیر قابل انکار می‌کند. متأسفانه در کشور ما علیرغم داشتن منابع عظیم نفت و گاز، توجه لازم و کافی به علم احتراق در زمینه‌های اقتصادی، زیست محیطی و فن‌آوری صورت نگرفته است. اگرچه در سال‌های اخیر این زمینه مهندسی توجه بیشتری را به خود جلب کرده است، ولی همچنان با مشکلات متعددی در زمینه مصرف بالای انرژی، توان پایین حرارتی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و فرسودگی تجهیزات روبه‌رو است. لذا ضروری است با تغییر نگرش، زمینه برای گسترش توجه به علوم وابسته به مهندسی احتراق فراهم شود. نقش مهم محفظه‌های احتراق در صنعت به خصوص در نیروگاه‌های تولید برق و توربین‌های گازی لازمه توجه به افزایش راندمان و توان حرارتی و کاهش آلودگی این اجزاء را بیشتر روشن می‌سازد. یکی از راه‌های رسیدن به تکنولوژی احتراق با توان حرارتی بالا استفاده از محیط متخلخل^۲ (PMC) برای پایدار کردن احتراق شعله آزاد با توان حرارتی بالا است [۱ و ۲]. از جمله برتری‌های مشعل‌های متخلخل نسبت به مشعل‌های معمولی می‌توان به بازده تابشی بالا، کم بودن آلودگی ناشی از NO_x ، سرعت شعله بالا، میزان بازه‌پذیری بار^۳ و دانسیته‌ی توان^۴ زیاد، کاهش حجم مشعل، افزایش محدوده شعله‌وری^۵، توزیع یکنواختی حرارت و کاهش سر و صدا

^۱ آیا آتشی را که بر می‌افروزید دیده‌اید؟ شما درخت آن را می‌آفرینید یا ما می‌آفرینیم؟ «واقعه/۵۶، ۷۱ و ۷۲».

^۲ Porous Media Combustion

^۳ Modulation

^۴ Power Density

^۵ Flamability Limit

اشاره کرد [۳، ۴]. با توجه به هزینه بالای مطالعات آزمایشگاهی، استفاده از شبیه‌سازی عددی به عنوان یک ابزار سودمند در مطالعات احتراقی مطرح است. یک برنامه تجاری که تأثیر مهم و بارزی در تحلیل محفظه احتراق و طراحی آن داشت، نرم‌افزار فلونت^۶ بود که در اواسط دهه ۱۹۸۰ توسعه یافت. به دلیل توانایی‌ها و در عین حال برخی محدودیت‌های مالی از بسته نرم‌افزاری فلونت در این تحقیق استفاده شده است.

۱-۲- انتقال حرارت و احتراق در محیط متخلخل

تفاوت میان احتراق در محیط متخلخل و احتراق با شعله‌ی آزاد، انتقال حرارت بهتر و مؤثرتر، از گازهای سوخته به مخلوط ورودی است. در شعله‌های آزاد جریان مخلوط نسوخته با نزدیک شدن به ناحیه‌ی واکنش پیش‌گرم می‌گردد. هنگامی که مواد نسوخته به ناحیه‌ی واکنش وارد می‌شوند، به دمای اشتعال رسیده و دمای مخلوط ناگهان افزایش می‌یابد. با توجه به این مطلب، احتراق شعله‌ی آزاد به‌خاطر پایین بودن ضریب هدایت حرارتی گاز دارای گرادیان شدید دما است. اجسام متخلخل دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به گازها هستند. بنابراین در حین احتراق، حرارت در خلاف جهت جریان از محصولات احتراق به مواد نسوخته سریع‌تر منتقل شده و باعث می‌شود تا دمای مخلوط نسوخته زودتر به دمای اشتعال برسد. در نتیجه طول منطقه‌ی احتراق افزایش می‌یابد. بزرگ‌تر شدن منطقه‌ی واکنش این امکان را فراهم می‌کند تا انتقال حرارت از جسم متخلخل بهتر صورت گیرد [۵]. همچنین پیش‌گرمایش مخلوط نسوخته افزایش پایداری احتراق را در پی دارد. تابش حرارتی و بالا بودن ضریب هدایت حرارتی محیط متخلخل علاوه بر اینکه موجب افزایش انتقال حرارت از منطقه‌ی واکنش می‌شود، موجب کاهش دمای بیشینه‌ی شعله و کاهش انتشار NOx می‌گردد [۶ و ۷].

تحقیقات زیادی روی حرارت برگشتی^۷ در شعله‌ها انجام گردیده است. وینبرگ^۸ [۸ و ۹] اولین کسی بود که آنتالپی اضافی مشعل‌ها را از طریق تئوری محاسبه کرد. او اندیشه‌ی استفاده

^۶ FLUENT

^۷ Heat Recirculation

^۸ Weinberg

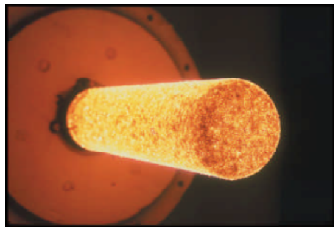
از مبدل حرارتی با حرارت برگشتی از محصولات گرم به واکنش دهنده‌هایی که می‌توانند رقیق باشند را ارائه کرد.

۳-۱- کاربردهای مشعل‌های متخلخل

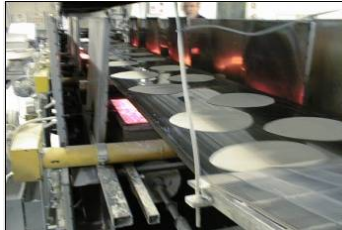
فرآیند احتراق در محیط متخلخل اهمیت کاربردی زیادی داشته و در تکنولوژی‌های بسیاری به کار می‌رود از جمله می‌توان در سیستم‌هایی نظیر کوره‌های با بستر بسته^۹، محفظه‌های احتراق احیاکننده، مشعل‌های تابشی متخلخل، مبدل‌ها و راکتورهای کاتالیستی، تبدیل مستقیم انرژی گاز، ابزارها و سیستم‌ها، تبدیل زغال سنگ به گاز، فرآیند ساخت و ترکیب مواد در دمای بالا، سوختن بدون آتش مواد اسفنجی و سلولی، سوزاندن چوب و مواد زائد کشاورزی و بسیاری موارد دیگر اشاره کرد [۳ و ۴]. از مشعل‌های محیط متخلخل به طور کلی می‌توان در دو دسته‌ی گرمایش مکان‌های مسکونی و آپارتمانی، و گرمایش صنعتی استفاده کرد. استفاده از مشعل‌های محیط متخلخل در صنعت از تنوع بیشتری برخوردار است. به عنوان نمونه می‌توان به مشعل‌های تابشی، خشک‌کن‌ها، محفظه‌ی احتراق توربین‌های گازی، صنایع شیشه‌گری، احتراق با سوخت مایع، صنایع غذایی، بخاری‌های مجزا از سیستم موتور اتومبیل، صنعت سیمان و سرامیک، فرآیندهای تولید بخار و راکتورهای شیمیایی اشاره کرد [۲، ۱، ۵ و ۷]. نمونه‌ای از کاربرد این نوع از مشعل‌ها در شکل ۱-۱ ارائه شده است.

افزایش محدوده توان حرارتی در مشعل‌های با احتراق متخلخل از جمله مواردی است که موجب مورد توجه قرار گرفتن آنها در سامانه‌های گرمایشی شده است. از آنجایی که میزان حرارت مورد نیاز در یک مکان بر حسب شرایط متفاوت است، بنابراین بالا بودن محدوده توان حرارتی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

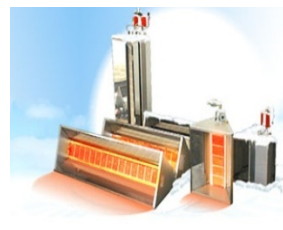
^۹ Packed Bed



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۱-۱. نمونه‌هایی از کاربرد مشعل متخلخل در (الف) گرمایش محیط (ب). صنعت پخت نان (پ) بویلر و توربین [۱]

۴-۱- خواص و ساختار مواد در مشعل متخلخل

مواد مورد استفاده برای مشعل متخلخل باید دارای ویژگی‌های مشخصی باشند. چراکه در دمای بالای محفظه‌ی احتراق، تنش‌های حرارتی شدیدی را تحمل کنند. این تنش‌ها به قدری زیاد است که ممکن است منجر به شکسته شدن ماده‌ی متخلخل شود. جسم متخلخل بایستی از مقاومت خوردگی بالایی نیز برخوردار باشد. در این راستا مطالعات متنوعی انجام شده است از جمله مطالعه‌ای که توسط هاول^{۱۰} و همکاران [۳] انجام شده است که در آن به برخی از خواص این مواد اشاره می‌گردد.

اکسید آلومینیم و دی‌اکسید زیرکونیوم دارای مقاومت دمایی تا حدود ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. زیرکونیای جامد به‌عنوان ماده‌ای است که بالاترین مقاومت دمایی را دارد. این ماده می‌تواند تا دمای ۲۳۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند. در مشعل‌های متخلخل از اسفنج‌های سرامیکی با مواد مختلف نیز استفاده می‌شود. از خصوصیات چنین ساختارهایی می‌توان به انتقال حرارت هدایت خوب، خواص انتقال حرارت تابشی پایین و افت فشار نسبتاً بالا نام برد. اجسام متخلخل بایستی دارای خواص مناسب انتقال حرارتی مانند ضریب هدایت و ضریب صدور بالا باشند تا دما در محفظه احتراق به صورت یکنواخت توزیع شده و دمای محفظه احتراق به مقدار زیادی کاهش یابد.

محیط متخلخل سرامیکی از جنس SiC ^{۱۱} که نوعی ساختار فومی است، دارای مقاومت

^{۱۰} Howell

^{۱۱} Silicon Carbide