



دانشگاه بیرجند  
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک (گرایش تبدیل انرژی)

عنوان:

**شبیه سازی عددی گذر از احتراق به انفجار در مخلوط های گازی**

استاد راهنما:

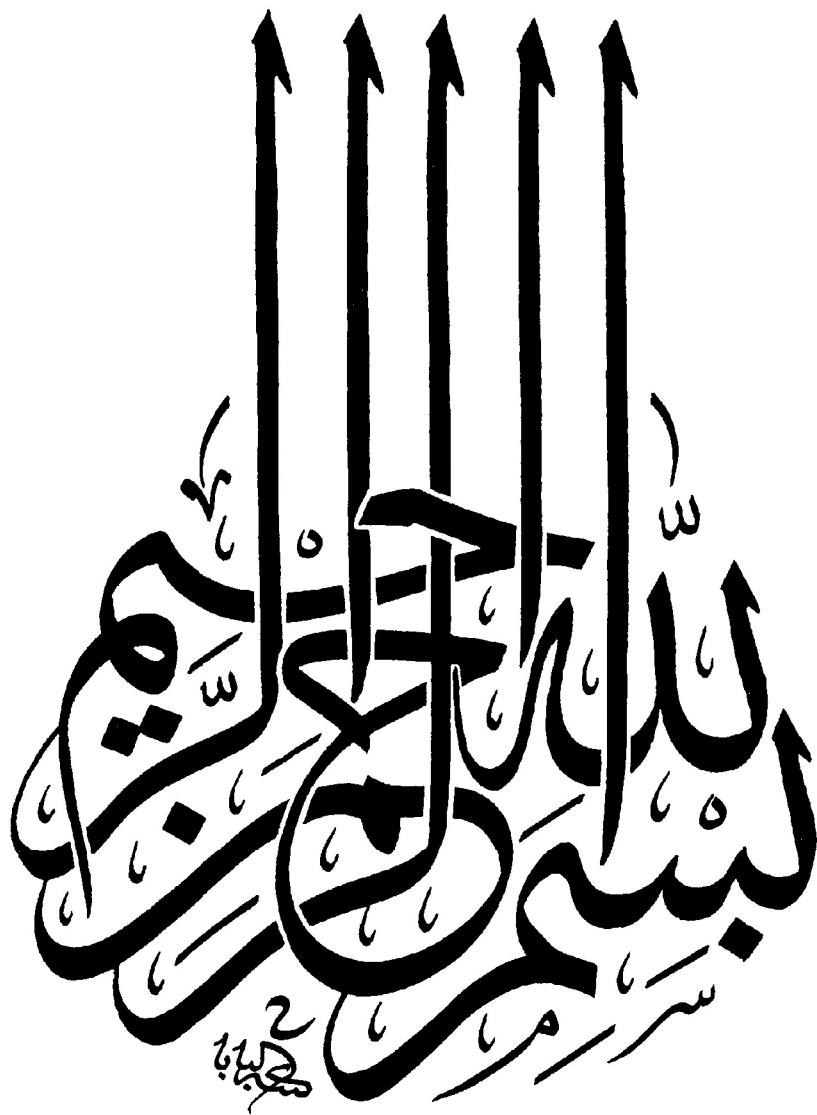
دکتر جواد خادم

نگارش:

پیمان طبسی کاخکی

دی ۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## چکیده

امروزه به دلیل کاربرد وسیع موتورهای انفجار پالسی، تحقیقات زیادی در زمینه پدیده گذر از احتراق به انفجار صورت می گیرد. یک مسئله مهم در رابطه با گذر از احتراق به انفجار، طول و زمان پیش از انفجار می باشد که کاهش آن از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پایان نامه اثر پارامترهای مهم جریان از جمله نسبت هم ارزی، فشار و دمای اولیه مخلوط و نیز انرژی اشتعال بر طول و زمان پیش از انفجار بررسی شده است. همچنین اثر وجود موانع آشفته ساز (اریفیس) در درون لوله را به عنوان روشی برای کاهش طول و زمان پیش از انفجار بررسی نموده ایم. در این پایان نامه از یک شبیه سازی عددی دو بعدی جریان آشفته در مختصات استوانه ای به همراه یک سنیتیک شیمیایی چند مرحله ای مخلوط استیلن - اکسیژن شامل ۱۹ جزء و ۲۵ واکنش شیمیایی که برای پایداری انفجار با نیتروژن رقیق سازی شده است، استفاده کرده ایم. نتایج عددی حاصل از این شبیه سازی تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان می دهد.

## تقدیم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهمان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر و برادران عزیزم تقدیم می کنم

## تقدیر و تشکر

در آغاز لازم می دانم از زحمات پدر و مادر گرامی ام و کلیه کسانی که در دوران تحصیل همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده اند کمال تشکر را داشته باشم.

همچنین از زحمات اساتید محترم آقایان دکتر حسن زاده، دکتر صفوی نژاد، دکتر ملک جعفریان، دکتر میربزرگی و به خصوص استاد ارجمند جناب آقای دکتر خادم که با راهنمایی های خود راه گشای اینجانب بوده اند کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

و نیز از زحمات دانشجویان صمیمی و مهربان دانشگاه بیرجند بالاخص جناب آقای مهندس کلاهدوز که کمک فراوانی در انجام این پایان نامه داشته اند تشکر و قدردانی می کنم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
خ	فهرست اشکال
ر	فهرست جداول
ز	فهرست علائم
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ مکانیزم های کاهش طول و زمان پیش از انفجار
۴	۳-۱ اهداف
۶	فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده
۷	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ مروری بر کارهای انجام شده اخیر
۱۳	فصل سوم: اصول مبانی انفجار
۱۴	۱-۳ مقدمه
۱۴	۲-۳ تئوری چاپمن-جوگت
۱۸	۳-۳ تئوری ZND
۲۰	۴-۳ عوامل موثر بر پدیده گذر از احتراق به انفجار
۲۴	فصل چهارم: مدل ریاضی جریان آشفته یک مخلوط گازی واکنشی
۲۵	۱-۴ مقدمه
۲۵	۲-۴ شبیه سازی مخلوط گازی چند جزئی
۲۶	۱-۲-۴ همگن سازی مشخصات یک محیط تراکم پذیر
۲۸	۳-۴ معادلات متوسط گیری شده فاوور برای دینامیک مخلوط های گازی چند جزئی
۲۸	۱-۳-۴ معادله پیوستگی
۲۸	۲-۳-۴ معادله بقای جرمی اجزاء
۲۹	۳-۳-۴ معادلات مومنتم

- ۴-۳-۴ معادله بقای انرژی و معادله حالت ..... ۳۰
- ۴-۳-۵ معادله رینولدز برای انرژی جنبشی ویژه نوسانات آشفتگی ..... ۳۲
- ۴-۴ شبیه سازی آشفتگی با مدل  $k - \epsilon$  ..... ۳۳
- ۴-۴ شکل قابل استفاده معادلات جهت مدل سازی مخلوط گاز چند جزئی ..... ۳۷
- ۴-۵-۱ معادلات حرکت (دینامیکی) ..... ۳۷
- ۴-۵-۲ معادله حالت ..... ۳۸
- ۴-۴ معادلات دینامیکی مخلوط گازی چند جزئی در سیستم مختصات استوانه ای ..... ۳۹
- ۴-۷ فعل و انفعالات شیمیایی در یک مخلوط گازی چند جزئی ..... ۴۱
- ۴-۸ شبیه سازی اشتعال مخلوط ..... ۴۳

### فصل پنجم: حل عددی مدل احتراق یک مخلوط گازی چند جزئی آشفته ..... ۴۴

- ۱-۵ مقدمه ..... ۴۵
- ۲-۵ محاسبه عددی پارامترهای مخلوط ..... ۴۶
- ۱-۲-۵ شبکه محاسباتی برای میدان مشخصه های مخلوط ..... ۴۶
- ۳-۵ نمادسازی برداری معادلات اساسی دینامیکی ..... ۴۷
- ۴-۵ جداسازی گام زمانی و اعمال آن در فرآیندها ..... ۴۹
- ۵-۵ محاسبات مربوط به ترم موضعی ..... ۵۱
- ۱-۵-۵ محاسبات سنیتیک شیمیایی ..... ۵۱
- ۲-۵-۵ محاسبه پارامترهای آشفتگی ..... ۵۳
- ۶-۵ محاسبات مربوط به ترم جابجایی ..... ۵۶
- ۱-۶-۵ مقدمه ..... ۵۶
- ۲-۶-۵ الگوریتم جداسازی اختلاف شارها یک جریان آشفته ..... ۵۷
- ۷-۵ محاسبه قسمت های آشفتگی و نفوذ معادلات ..... ۷۰
- ۱-۷-۵ مقدمه ..... ۷۰
- ۲-۷-۵ معادلات تفاضلی و ضرایب آن ها ..... ۷۰
- ۳-۷-۵ ضرایب معادلات برای شرایط مرزی ..... ۷۵
- ۸-۵ شرایط مرزی برای مشخصه های یک مخلوط گازی چند جزئی ..... ۷۶
- ۹-۵ شرایط اولیه در مخلوط گازی چند جزئی ..... ۷۷
- ۱۰-۵ کد کامپیوتری ..... ۷۸

۷۹	فصل ششم: نتایج
۸۰	۱-۶ مقدمه
۸۰	۲-۶ مشخصات حوزه حل
۸۱	۳-۶ تولید شبکه
۸۴	۴-۶ اعتبار سنجی حل عددی
۸۹	۵-۶ نتایج حاصل برای یک لوله صاف
۸۹	۱-۵-۶ تغییرات فشار و دمای مرکز لوله برحسب فاصله در زمان های مختلف
۹۱	۲-۵-۶ کانتورهای سرعت افقی در یک لوله صاف
۹۳	۳-۵-۶ کانتورهای فشار در یک لوله صاف
۹۵	۴-۵-۶ کانتورهای دما در یک لوله صاف
۹۷	۵-۵-۶ کانتورهای چگالی مخلوط در یک لوله صاف
۹۹	۶-۵-۶ اثر نسبت هم ارزی مخلوط بر فاصله و زمان پیش از انفجار
۱۰۱	۷-۵-۶ اثر فشار اولیه مخلوط بر فاصله و زمان پیش از انفجار
۱۰۳	۸-۵-۶ اثر دمای اولیه مخلوط بر فاصله و زمان پیش از انفجار
۱۰۵	۹-۵-۶ اثر انرژی اشتعال بر فاصله و زمان پیش از انفجار
۱۰۷	۱۰-۵-۶ اثر نسبت هم ارزی، فشار و دمای اولیه مخلوط بر سرعت انفجار
۱۱۰	۶-۶ نتایج حاصل برای یک لوله اریفیس دار
۱۱۳	۱-۶-۶ تغییرات فشار و دمای مرکز لوله برحسب فاصله
۱۱۵	۲-۶-۶ کانتورهای سرعت افقی در یک لوله اریفیس دار
۱۱۷	۳-۶-۶ کانتورهای فشار در یک لوله اریفیس دار
۱۱۹	۴-۶-۶ کانتورهای دما در یک لوله اریفیس دار
۱۲۱	۵-۶-۶ اثر موانع بر فاصله و زمان پیش از انفجار در نسبت های هم ارزی مختلف
۱۲۳	۶-۶-۶ اثر نسبت انسداد اریفیس ها بر فاصله و زمان پیش از انفجار
۱۲۶	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۲۷	۱-۷ نتیجه گیری
۱۲۹	۲-۷ پیشنهادات
۱۳۰	منابع و مراجع



## فهرست اشکال

### فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده

- شکل (۱-۲): سرعت شعله مخلوط هیدروژن - هوا برحسب فاصله برای مخلوط های هیدروژن-هوا ..... ۹
- شکل (۲-۲): شتاب شعله پروپان-هوا با تغییرنسبت انسداد موانع و درصد پروپان ..... ۱۰
- شکل (۳-۲): سرعت شعله برحسب فاصله برای مخلوط های هیدروژن-هوا در دمای ۳۰۰K و فشار ۰/۱ MPa ..... ۱۰
- شکل (۴-۲): تغییرات طول پیش از انفجار نسبت به شعاع حلقه اشتعال در نسبت های هم ارزی مختلف مخلوط هیدروژن - هوا ..... ۱۱

### فصل سوم: اصول مبانی انفجار

- شکل (۱-۳): موج احتراق ساکن در مدل چاپمن - جوگت ..... ۱۵
- شکل (۲-۳): منحنی هوگونویوت در مدل چاپمن - جوگت ..... ۱۵
- شکل (۳-۳): موج متحرک در مدل چاپمن - جوگت ..... ۱۷
- شکل (۴-۳): ساختار جبهه موج شاک در مدل ZND ..... ۱۸
- شکل (۵-۳): نواحی تاخیر و واکنش در مدل ZND و تغییر خواص پشت جبهه شاک ZND ..... ۱۹
- شکل (۶-۳): اثر نوع سوخت مختلف بر فاصله پیش از انفجار ..... ۲۰
- شکل (۷-۳): اثر نسبت هم ارزی مختلف مخلوط بر زمان پیش از انفجار ..... ۲۱
- شکل (۸-۳): اثر مقدار انرژی اولیه مختلف بر فاصله پیش از انفجار ..... ۲۲
- شکل (۹-۳): وجود فنر شلکین در درون لوله جهت آشفتهگی جریان ..... ۲۲
- شکل (۱۰-۳): نمایش اریفیس ها در درون لوله جهت آشفتهگی جریان ..... ۲۳
- شکل (۱۱-۳): وجود محفظه در طول لوله جهت آشفتهگی جریان ..... ۲۳

### فصل ششم: نتایج

- شکل ۱-۶: نمایش ابعاد لوله صاف ..... ۸۰
- شکل ۲-۶: نمایش ابعاد یک لوله اریفیس دار ..... ۸۱
- شکل ۳-۶: مش بندی یکنواخت لوله صاف ..... ۸۲
- شکل ۴-۶: نمایش شعاع های داخلی و خارجی یک صفحه اریفیس واقع در درون لوله ..... ۸۳
- شکل ۵-۶: مش بندی غیر یکنواخت لوله اریفیس دار ..... ۸۳
- شکل ۶-۶: مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۵۴] و سرعت چاپمن - جوگت برای دمای اولیه K ۲۹۳ و واکنش  $C_2H_2 + 2.5 O_2$  ..... ۸۴
- شکل ۷-۶: مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۵۴] و سرعت چاپمن - جوگت برای دمای اولیه K ۲۹۳ و واکنش  $C_2H_2 + 2.5 O_2 + 3.5 AR$  ..... ۸۵
- شکل ۸-۶: مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۵۴] و سرعت چاپمن - جوگت برای دمای اولیه K ۵۰۰ و واکنش  $C_2H_2 + 2.5 O_2$  ..... ۸۵
- شکل ۹-۶: مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۵۴] و سرعت چاپمن - جوگت برای دمای اولیه K ۵۰۰ و واکنش  $C_2H_2 + 2.5 O_2 + 3.5 AR$  ..... ۸۶

- شکل ۱۰-۶: تغییرات سرعت جبهه شعله مخلوط استیلن - هوا بر حسب فاصله لوله در شرایط دمایی ۲۹۳ K، فشار ۱۰۰ kpa و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۸۷
- شکل ۱۱-۶: منحنی مکان جبهه شعله بر حسب زمان برای مخلوط استیلن - هوا در شرایط دمایی ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۸۸
- شکل ۱۲-۶: تغییرات فشار مرکز لوله بر حسب فاصله لوله در زمان های مختلف برای مخلوط استیلن - هوا در شرایط دمایی ۳۵۰ K، فشار ۱۰۰ kpa و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۸۹
- شکل ۱۳-۶: تغییرات دمایی مرکز لوله بر حسب فاصله لوله در زمان های مختلف برای مخلوط استیلن - هوا در شرایط دمایی ۳۵۰ K، فشار ۱۰۰ kpa و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۹۰
- شکل ۱۴-۶: کانتورهای سرعت افقی در طول یک لوله صاف در زمان های مختلف برای مخلوط استیلن - هوا در شرایط دمایی ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۹۲
- شکل ۱۵-۶: کانتورهای فشار در طول یک لوله صاف در زمان های مختلف برای مخلوط استیلن - هوا در شرایط دمایی ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۹۴
- شکل ۱۶-۶: کانتورهای دما در طول یک لوله صاف در زمان های مختلف برای مخلوط استیلن - هوا در شرایط دمایی ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۹۶
- شکل ۱۷-۶: کانتورهای چگالی مخلوط در طول یک لوله صاف در زمان های مختلف برای مخلوط استیلن - هوا در شرایط دمایی ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۹۸
- شکل ۱۸-۶: فاصله پیش از انفجار بر حسب تغییرات نسبت هم ارزی مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط دمایی ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa و انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  ج ..... ۹۹
- شکل ۱۹-۶: زمان پیش از انفجار بر حسب تغییرات نسبت هم ارزی مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط دمایی ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa و انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  ج ..... ۱۰۰
- شکل ۲۰-۶: فاصله پیش از انفجار بر حسب تغییرات فشار اولیه مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط دمایی ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa و انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  ج ..... ۱۰۱
- شکل ۲۱-۶: زمان پیش از انفجار بر حسب تغییرات فشار اولیه مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط دمایی ۲۹۸ K، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  و انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  ج ..... ۱۰۲
- شکل ۲۲-۶: فاصله پیش از انفجار بر حسب تغییرات دمایی اولیه مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  و انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  ج ..... ۱۰۳
- شکل ۲۳-۶: زمان پیش از انفجار بر حسب تغییرات دمایی اولیه مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  و انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  ج ..... ۱۰۴
- شکل ۲۴-۶: فاصله پیش از انفجار بر حسب تغییرات انرژی اشتعال در مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  و دمایی ۲۹۸ K ..... ۱۰۵
- شکل ۲۵-۶: زمان پیش از انفجار بر حسب تغییرات انرژی اشتعال در مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  و دمایی ۲۹۸ K ..... ۱۰۶
- شکل ۲۶-۶: سرعت انفجار بر حسب تغییرات نسبت هم ارزی مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط فشار ۱۰۰ kpa، دمایی ۲۹۸ K و انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  ج ..... ۱۰۷
- شکل ۲۷-۶: سرعت انفجار بر حسب تغییرات فشار اولیه مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط دمایی ۲۹۸ K، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  و انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  ج ..... ۱۰۸

- شکل ۶-۲۸: سرعت انفجار بر حسب تغییرات دمای اولیه مخلوط استیلن - هوا در یک لوله صاف برای شرایط فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  و انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  ..... ۱۰۹
- شکل ۶-۲۹: نمایش اریفیس ها در تمام طول لوله ..... ۱۱۰
- شکل ۶-۳۰: نمایش اریفیس ها در نصف ابتدایی طول لوله ..... ۱۱۰
- شکل ۶-۳۱: سرعت جبهه شعله بر حسب فاصله در یک لوله اریفیس دار برای فواصل مختلف شروع اولین اریفیس از ابتدای لوله ..... ۱۱۱
- شکل ۶-۳۲: سرعت جبهه شعله بر حسب فاصله لوله برای دو حالت: الف) با وجود اریفیس در تمام طول لوله ب) با وجود اریفیس در نصف ابتدایی لوله ..... ۱۱۲
- شکل ۶-۳۳: تغییرات فشار مرکز لوله مخلوط استیلن - هوا بر حسب فاصله در یک لوله اریفیس دار در زمان های مختلف برای شرایط دمای ۳۰۰ K، فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$ ، انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  و نسبت انسداد  $BR = 0.31$  ..... ۱۱۳
- شکل ۶-۳۴: تغییرات دمای مرکز لوله مخلوط استیلن - هوا بر حسب فاصله در یک لوله اریفیس دار در زمان های مختلف برای شرایط دمای ۳۰۰ K، فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$ ، انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  و نسبت انسداد  $BR = 0.31$  ..... ۱۱۴
- شکل ۶-۳۵: کانتورهای سرعت افقی در طول یک لوله اریفیس دار برای مخلوط استیلن - هوا در زمان های مختلف برای شرایط دمای ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$ ، انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  و نسبت انسداد  $BR = 0.43$  ..... ۱۱۶
- شکل ۶-۳۶: کانتورهای فشار در طول یک لوله اریفیس دار برای مخلوط استیلن - هوا در زمان های مختلف برای شرایط دمای ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$ ، انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  و نسبت انسداد  $BR = 0.43$  ..... ۱۱۸
- شکل ۶-۳۷: کانتورهای دما در طول یک لوله اریفیس دار برای مخلوط استیلن - هوا در زمان های مختلف برای شرایط دمای ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa، نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$ ، انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  و نسبت انسداد  $BR = 0.43$  ..... ۱۲۰
- شکل ۶-۳۸: فاصله پیش از انفجار بر حسب تغییرات نسبت هم ارزی مخلوط استیلن - هوا برای شرایط دمای ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa، انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  در سه حالت: الف) لوله صاف ب) لوله ای با نسبت انسداد  $BR = 0.31$  ج) لوله ای با نسبت انسداد  $BR = 0.43$  ..... ۱۲۱
- شکل ۶-۳۹: زمان پیش از انفجار بر حسب تغییرات نسبت هم ارزی مخلوط استیلن - هوا برای شرایط دمای ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa، انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  در سه حالت: الف) لوله صاف ب) لوله ای با نسبت انسداد  $BR = 0.31$  ج) لوله ای با نسبت انسداد  $BR = 0.43$  ..... ۱۲۲
- شکل ۶-۴۰: فاصله پیش از انفجار بر حسب تغییرات نسبت انسداد اریفیس ها در مخلوط استیلن - هوا برای شرایط دمای ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa، انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۱۲۳
- شکل ۶-۴۱: زمان پیش از انفجار بر حسب تغییرات نسبت انسداد اریفیس ها در مخلوط استیلن - هوا برای شرایط دمای ۲۹۸ K، فشار ۱۰۰ kpa، انرژی اشتعال  $E_{ig} = 1$  و نسبت هم ارزی  $\Phi = 1$  ..... ۱۲۴

## فهرست جداول

### فصل چهارم: مدل ریاضی جریان آشفته یک مخلوط گازی واکنشی

جدول (۱-۴): فهرست نماد ها و عملیات برداری و تانسوری ..... ۲۶

جدول (۲-۴): مکانیزم سنیتیک کوتاه واکنش های چند مرحله ای مخلوط استیلن - اکسیژن ..... ۴۱

### فصل ششم: نتایج

جدول ۱-۶: مکان آغاز انفجار بر حسب تغییرات تعداد نقاط شبکه در جهت  $x$  ..... ۸۱

جدول ۲-۶: مکان آغاز انفجار بر حسب تغییرات تعداد نقاط شبکه در جهت  $r$  ..... ۸۲

## فهرست علائم

$a$ (m/s)	سرعت صوت
$A_r \left( s^{-1} \left( \frac{cm^3}{mol} \right)^{r_0-1} \right)$	ضریب آرنیوس
$BR$	نسبت انسداد
$C_{CFL}$	عدد کورانت
$CJ$	چاپمن - جوگت
$\hat{C}_p$ (KJ/Kg.K)	گرمای ویژه متوسط در فشار ثابت
$c_{p_k}$ (KJ/Kg.K)	گرمای ویژه در فشار ثابت جزء k ام
$\hat{C}_v$ (KJ/Kg.K)	گرمای ویژه متوسط در حجم ثابت
$C_{v_k}$ (KJ/Kg.K)	گرمای ویژه جزء k ام در حجم ثابت
$C_\mu$	ضریب ثابت در مدل $k - \varepsilon$
$C_{1\varepsilon}$	ضریب ثابت در مدل $k - \varepsilon$
$C_{2\varepsilon}$	ضریب ثابت در مدل $k - \varepsilon$
$DDT$	گذر از احتراق به انفجار
$D_i$	ضریب نفوذ مولکولی
$D_\mu$	ضریب انتقال لزجت موثر
$E$ (KJ/Kg)	انرژی داخلی کل
$\dot{E}_{ex}$ (J/m <sup>3</sup> .s)	انرژی ورودی از خارج
$E_{ig}$ (J)	انرژی کل اشتعال

$e_k (KJ/Kg)$	انرژی داخلی جزء k ام
$E_a (KJ/mol)$	انرژی فعال سازی
$f$	خاصیت جریان
$\langle f \rangle$	مقدار متوسط زمانی خاصیت جریان
$[f]$	مقدار متوسط فاوور خاصیت جریان
$f'$	مولفه نوسانی خاصیت جریان در متوسط گیری زمانی
$f''$	مولفه نوسانی خاصیت جریان در متوسط گیری فاوور
$F_{\mu}(d)$	تابع دیواره در مدل لام - برمهورست
$F_{1\varepsilon}(d)$	ضریب در تابع دیواره مدل لام - برمهورست
$F_{2\varepsilon}(d)$	ضریب در تابع دیواره مدل لام - برمهورست
$G^{\circ}_k (J/Kg)$	انرژی استاندارد گیبس برای جزء k ام
$h_k (KJ/Kg)$	آنتالپی جزء k ام
$h_{0k}$	آنتالپی تشکیل جزء k ام
$\vec{I}_k^{(l)}$	شار نفوذی مولکولی آرام جزء k ام
$\vec{I}_k^{(t)}$	شار نفوذی مولکولی آشفته جزء k ام
$\vec{I}_k$	شار نفوذی مولکولی کل جزء k ام
$\vec{I}_q^{(l)}$	شار انرژی گرمایی آرام جزء k ام
$\vec{I}_q^{(t)}$	شار انرژی گرمایی آشفته جزء k ام
$\vec{I}_q$	شار انرژی گرمایی کل جزء k ام
$\vec{I}_{ch}$	شار نفوذی ناشی انرژی شیمیایی
$\vec{J}_q$	شار انرژی گرمایی هدایتی
$\vec{J}_k$	شار انرژی جنبشی آشفته

$\vec{J}_\varepsilon$	شار نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته
$k (m^2/s^2)$	انرژی جنبشی آشفته
$k_0$	انرژی جنبشی آشفته در لحظه اولیه
$k_{fr}$	ثابت نرخ واکنش رفت
$k_{br}$	ثابت نرخ واکنش برگشت
$N$	تعداد اجزاء واکنش
$n_r$	توان ضریب دما در معادله آرنیوس
$P_1$	ضریب تولید انرژی آشفته
$P_2$	ضریب تولید انرژی آشفته
$P_{atm}(Pa)$	فشار اتمسفر
$P(Pa)$	فشار کل
$PDE$	موتور انفجار پالسی
$P_0$	فشار اولیه مخلوط
$Q_{ig} (J/s)$	گرمای کل منبع اشتعال
$R_g(J/mol.K)$	ثابت جهانی گازها
$r_{ig}$	شعاع منطقه اشتعال کروی
$r_0$	مرتبه واکنش
$t (s)$	زمان
$t_{ig}$	زمان اشتعال
$s (J/m^3K)$	انترپپی مخلوط بر واحد جرم
$T (K)$	دما
$T_0$	دمای اولیه مخلوط

$T_{ref}$	دمای مرجع
$u_{0k}$	انرژی داخلی تشکیل جزء k ام در دمای مرجع
$\vec{v} (m/s)$	سرعت
$v_r$	سرعت در راستای شعاع
$v_x$	سرعت در راستای محور افقی
$v'_{kr}$	ضرایب استوکیومتریک جزء k ام در ورودی
$v''_{kr}$	ضرایب استوکیومتریک جزء k ام در خروجی
$W (gr/mol)$	جرم مولکولی کل
$W_k$	جرم مولکولی جزء k ام
$x$	ثابت ون کارمن
$X_k$	کسر مولی جزء k ام
$X_k^0$	کسر مولی جزء k ام در لحظه اولیه
$Y_k$	کسر جرمی جزء k ام
$Y_k^0$	کسر جرمی جزء k ام در لحظه اولیه
$ZND$	مدل زلدویچ - ون نیومن - دورینگ

### علائم یونانی

$\gamma$	ضریب آدیباتیک
$\varepsilon (m^2/s^3)$	نرخ اضمحلال انرژی آشفته
$\varepsilon_0$	نرخ اضمحلال انرژی آشفته در لحظه اولیه
$\lambda (W/m.k)$	ضریب هدایت حرارتی



$\mu (N.s/m^2)$	لزجت دینامیکی
$\mu_t$	لزجت دینامیکی آشفته
$\nu (m^2/s)$	لزجت سینماتیکی
$\nu_t$	لزجت سینماتیکی آشفته
$\rho (Kg/m^3)$	چگالی
$\rho_0$	چگالی در لحظه اولیه
$\sigma_i$	ضریب ثابت در مدل $k - \varepsilon$
$\sigma_T$	ضریب ثابت در مدل $k - \varepsilon$
$\sigma_k$	ضریب ثابت در مدل $k - \varepsilon$
$\sigma_\varepsilon$	ضریب ثابت در مدل $k - \varepsilon$
$\tau_n$	گام زمانی
$\tau^{(l)}$	تانسور تنش آرام
$\tau^{(t)}$	تانسور تنش آشفته
$\tau$	تانسور تنش کل
$\Phi$	نسبت هم ارزی مخلوط
$\Psi$	عملگر همانی
$\dot{\omega}_k$	نرخ تشکیل جزء $k$ ام
$\Omega_{ig}$	حجم منطقه اشتعال

# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

پدیده انفجار<sup>۱</sup> ابتدا در سال ۱۸۸۱ توسط مالارد و لوشاتلیر [۱] و برتلوت [۲،۳] کشف گردید و آنها اولین کسانی بودند که به تحقیق انتشار شعله در مخلوط های گازی همگن پرداختند و وجود نوعی از موج احتراق مافوق صوت که با سرعت چند هزار متر بر ثانیه حرکت می کرد را مشاهده نمودند.

تشریح تئوری اولیه این پدیده ابتدا توسط میخلسون [۴]، چاپمن [۵] و چوگت [۶] ارائه شد و این خود آغازی برای مطالعه بیشتر پدیده انفجار بود.

یک تفاوت عمده بین دو مدل احتراق شناخته شده یعنی احتراق<sup>۲</sup> و انفجار در مسئله تبدیل انرژی می باشد. در موج احتراق، انرژی شیمیایی مخلوط به انرژی جنبشی و گرمایی محصولات در حال انبساط تبدیل می شود در حالی که در موج انفجار قسمتی از انرژی شیمیایی به انرژی فشاری برای تراکم محصولات احتراق تبدیل می شود [۷].

افزایش شدید فشار در موج های انفجار مانع از کاربردهای این پدیده برای اهداف غیر مخرب بود. با وجود این کاربرد انفجار مخلوط های سوخت - هوا می توانست برای بیشتر مسائل که نیازمند خروج نیروی رانش باشند، مفید واقع شود.

تا چندین دهه قبل، بررسی پدیده گذر از احتراق به انفجار<sup>۳</sup> برای اهداف ایمنی و جلوگیری از خسارات ناشی از انفجار در تاسیسات شیمیایی صورت می گرفت. اما امروزه از این پدیده برای اهداف گوناگونی همچون صنایع هوایی، حفاری، ایجاد پوشش های محافظ و ایجاد رانش مورد استفاده قرار می گیرد. بعنوان مثال برای پرواز با سرعت بیشتر و دستیابی به اعداد ماخ ۴-۲ و همچنین رسیدن به ارتفاع بیشتر و ورود به مدار زمین، وسایل پیش رانش پیشرفته ای نیاز است.

پدیده گذر از احتراق به انفجار می تواند در گسترش بیشتر سیستم های پیش رانش پیشرفته بکار گرفته شود. در همه این موارد نیاز به تجهیزاتی است که انفجارهای نوسانی ایجاد نمایند. یکی از مسائل مهم در ایجاد چنین تجهیزاتی آغاز انفجار است.

---

<sup>۱</sup> Detonation

<sup>۲</sup> Deflagration

<sup>۳</sup> Deflagration to Detonation Transition (DDT)

موتورهای انفجار پالسی<sup>۱</sup> کاربردی است که در آن‌ها از پدیده گذر از احتراق به انفجار (DDT) استفاده می‌شود [۸]. یکی از مهمترین و اصلی‌ترین فواید موتورهای انفجار پالسی این است که در انفجار آنتروپی کمتری نسبت به فرآیندهای مرسوم احتراق فشار ثابت هنگام احتراق یک مخلوط سوخت - هوا تولید می‌شود [۹].

موتورهای انفجار پالسی اصولاً برای عدم نیاز به انرژی اولیه زیاد در آغاز احتراق، به پدیده گذر از احتراق به انفجار متکی می‌باشند. فرآیند DDT فرآیندی است که به وسیله آن یک احتراق توسط یک منبع انرژی ضعیف (معمولاً در حدود ۱ ژول) آغاز می‌شود. سپس شعله مادون صوت از طریق یک سری از فرآیندهای دینامیکی گاز شتاب گرفته، سرانجام قبل از اینکه از لوله خارج شود به انفجار مافوق صوت تبدیل می‌شود [۱۰].

## ۱-۲ مکانیزم‌های کاهش طول و زمان پیش از انفجار

مسئله مهم در رابطه با گذر از احتراق به انفجار، طول و زمان پیش از انفجار<sup>۲</sup> می‌باشد. یک روش برای کاهش طول و زمان پیش از انفجار افزودن اکسیژن در ناحیه آغاز احتراق می‌باشد. این عمل می‌تواند به شدت طول و زمان لازم برای DDT را کاهش دهد ولی پیچیدگی زیاد، افزایش وزن و تجهیزات لجستیکی قابل توجهی را برای سیستم پیش رانش به همراه دارد. اما روش دیگر برای کوتاه کردن طول و زمان پیش از انفجار، اعمال آشفتگی<sup>۳</sup> در داخل جریان می‌باشد، که می‌تواند به صورت‌های زیر انجام پذیرد:

۱ - استفاده از فنر شلکین<sup>۴</sup> در ابتدای لوله نزدیک دیواره‌ها [۱۲].

۲ - استفاده از محفظه در اولین قسمت لوله، جایی که جرقه اتفاق می‌افتد [۱۳، ۱۵].

۳ - قرار دادن صفحات اریفیس<sup>۵</sup> دایروی در داخل لوله [۱۶].

<sup>۱</sup> Pulse Detonation Engine (PDE)

<sup>۲</sup> Predetonation Length & Time

<sup>۳</sup> Turbulence

<sup>۴</sup> Shchelkin

<sup>۵</sup> Orifice