

Tarbiat Modares University  
Faculty of Mechanical Engineering  
Energy Conversion Group

# **Investigation of Air/Fuel Mixing Flow in Non-Premixed Burners**

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)  
in Mechanical Engineering

By:

**Vahid Parsa**

Supervisor:

**Prof. Kiumars Mazaheri**

Advisor:

**Dr. Alireza Alipour**

November 2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

بررسی اختلاط جریان سوخت و هوا در مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته

نگارنده

وحید پارسا

استاد راهنما

دکتر کیومرث مظاهری

استاد مشاور

دکتر علیرضا علی‌پور

آبان ۱۳۹۶

## چکیده

امروزه فرآیند احتراق در صنایع و کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به افزایش روزافزون میزان آلاینده‌های زیست محیطی، کیفیت احتراق و میزان آلاینده‌های خروجی از آن اهمیت بسیاری دارد. یکی از عواملی که می‌تواند در کیفیت احتراق مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته مؤثر باشد، کیفیت و چگونگی اختلاط سوخت و هواست. چرا که جهت دستیابی به شعله‌ای با راندمان بالاتر، می‌بایست نسبت اختلاط هوا به سوخت را حد مناسبی نگه داشت. از لحاظ تئوریک، بهترین مخلوط متشکل از مقدار کافی هوا و در واقع مقدار کافی اکسیژن است تا بتواند سوخت گاز را بطور کامل بسوزاند. این مخلوط مناسب را مخلوط استوکیومتریکی می‌نامند. بنابر این جهت افزایش راندمان احتراق و در واقع بهره‌وری بیشتر از انرژی سوخت، می‌بایست به اختلاطی مناسب‌تر و نزدیک‌تر به شرایط استوکیومتریکی دست یافت. در تحقیق حاضر، در ابتدا به مدلسازی جریان سوخت و هوا و چگونگی اختلاط این دو سیال با یکدیگر در یک مشعل جت قوی اجت ضعیف پرداخته شده است. با ایجاد تغییراتی در هندسه و جریان مسئله‌ی معیار اولیه، حالت‌های متفاوتی از اختلاط و توزیع سوخت و هوا در محفظه بدست آمد. پارامترهایی از قبیل قطر نازل سوخت، زاویه پاشش سوخت و تعداد نازل‌های سوخت و هوا بعنوان عواملی تأثیرگذار در نحوه‌ی اختلاط جریان‌ها مورد نظر قرار گرفته است. در شرایطی که مقدار کسر مخلوط جریان در میدان اختلاط، مطلوب‌تر است. در نهایت پس از احتراق با کیفیت بالاتری صورت گرفته است. از طرفی یکنواختی کسر مخلوط جریان در میدان اختلاط، مطلوب‌تر است. در نهایت پس از صحت‌سنجی مدل‌های احتراقی مورد استفاده، به شبیه‌سازی جریان احتراق در دو نمونه مشعل با اختلاط‌های متفاوت پرداخته شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی این امر بود که اختلاط یکنواخت‌تر و نزدیک‌تر به شرایط استوکیومتریکی، شعله‌ی بهتری را تشکیل داده و راندمان حرارتی مشعل بهبود می‌یابد. اما میزان آلاینده‌ی CO در خروجی افزایش یافت که به سبب بیش‌تر بودن سوخت موضعی در هندسه‌ی اصلاح‌شده، این مسئله قابل توجه است. لزوماً افزایش میزان CO نسبت به حالت معیار، نشان‌دهنده‌ی احتراق با کیفیت پایین‌تر نیست؛ چرا که در حالت اول به سبب نسبت‌های بالای هوا به سوخت، احتراق دما پایین و ناقص‌تری صورت گرفته و عملاً بخشی از سوخت در واکنش شرکت نکرده و از محفظه خارج می‌شود.

## کلمات کلیدی

کیفیت احتراق، اختلاط سوخت و هوا، جت قوی اجت ضعیف، زاویه پاشش، قطر ورودی نازل

## فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه	۱
۱-۱- پیشگفتار	۱
۲-۱- اختلاط سوخت و هوا	۱
۳-۱- مشعل‌های جت قوی-جت ضعیف	۲
۴-۱- مروری بر کارهای تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی	۲
۵-۱- اهداف تحقیق حاضر و ساختار کلی	۵
فصل ۲ معادلات حاکم و روش حل عددی	۷
۱-۲- معادلات حاکم برای شبیه‌سازی جریان در محفظه‌ی مشعل	۷
۱-۲-۱- معادله پیوستگی	۷
۲-۱-۲- معادله بقای مومنتم	۸
۳-۱-۲- معادله بقای گونه‌ها	۹
۴-۱-۲- معادله بقای انرژی	۹
۵-۱-۲- معادله حالت گاز ایده‌آل	۱۰
۶-۱-۲- مدل‌سازی اغتشاش	۱۱
۷-۱-۲- مدل‌سازی احتراق	۱۳
۸-۱-۲- مکانیزم شیمیایی	۱۶
۹-۱-۲- مدل‌سازی تشعشع	۱۷
۲-۲- روش حل عددی	۱۸
۳-۲- جمع‌بندی	۱۹
فصل ۳ نتایج	۲۰

۲۰.....	۱-۳- مشخصات مشعل شبیه‌سازی شده با جریان سرد.....
۲۱.....	۱-۱-۳- کیفیت شبکه‌بندی میدان محاسباتی.....
۲۲.....	۲-۱-۳- اعتبارسنجی.....
۲۴.....	۳-۱-۳- پارامتر اختلاط.....
۲۵.....	۴-۱-۳- بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر اختلاط جریان سوخت و هوا.....
۲۸.....	۲-۳- مشخصات مشعل شبیه‌سازی شده با جریان احتراقی.....
۲۹.....	۲-۲-۳- کیفیت شبکه‌بندی میدان محاسباتی.....
۳۰.....	۳-۲-۳- صحت سنجی مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی احتراقی.....
۳۲.....	۳-۳- شبیه‌سازی جریان احتراقی در مسئله‌ی معیار اولیه.....
۳۴.....	۴-۳- جمع‌بندی.....
۳۶.....	فصل ۴ جمع‌بندی و پیشنهادات.....
۳۶.....	۱-۴- خلاصه و جمع‌بندی تحقیق انجام گرفته.....
۳۶.....	۲-۴- پیشنهادات جهت ادامه‌ی کار.....
۳۸.....	مراجع.....

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) یک واکنشگاه نیم‌مخلوط PaSR ..... ۱۴
- شکل (۲-۳) دو مرحله واکنش و اختلاط در یک واکنشگاه PaSR ..... ۱۵
- شکل (۱-۳) هندسه‌ی متقارن صفحه‌ای مشعل شبیه‌سازی شده ..... ۲۱
- شکل (۲-۳) هندسه‌ی شماتیک میدان حل ..... ۲۱
- شکل (۳-۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان سرد در شبکه‌های مختل ..... ۲۲
- شکل (۴-۳) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در فاصله‌ی 19.9mm از سطح مقطع ورودی ..... ۲۳
- شکل (۵-۳) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در فاصله‌ی 120mm از سطح مقطع ورودی ..... ۲۳
- شکل (۶-۳) کانتور تغییرات پارامتر X در قطرنازل سوخت برای قطرهای متفاوت ..... ۲۵
- شکل (۷-۳) کانتور تغییرات پارامتر X با زوایای مختلف پاشش سوخت ..... ۲۶
- شکل (۸-۳) کانتور تغییرات پارامتر X با دو نازل سوخت و دو نازل هوا ..... ۲۷
- شکل (۹-۳) نمای فوقانی و جانبی کوره ..... ۲۹
- شکل (۱۰-۳) شماتیک میدان حل ..... ۲۹
- شکل (۱۱-۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی احتراق در شبکه‌بندی متفاوت ..... ۳۰
- شکل (۱۵-۳) کانتور توزیع دما و ساختار شعله در هندسه‌ی معیار و اصلاح شده ..... ۳۳

## فهرست جداول

- جدول (۱-۲) ثوابت مدل Standard k-ε ..... ۱۲
- جدول (۱-۳) مشخصات جریان ورودی سوخت و هوا در حالت بدون احتراق ..... ۲۰
- جدول (۲-۳) میزان خطای سرعت در راستای عمودی ( $U_x$ ) برای محاسبات عددی در مقایسه با نتایج تجربی ..... ۲۴
- جدول (۳-۳) مشخصات قطر و سرعت‌های ورودی سوخت در بررسی اول ..... ۲۵
- جدول (۴-۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی قطرهای متفاوت ورودی سوخت ..... ۲۶
- جدول (۵-۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی زوایای مختلف پاشش سوخت ..... ۲۷
- جدول (۶-۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی تعداد متفاوت نازل سوخت و هوا ..... ۲۸
- جدول (۷-۳) مشخصات جریان ورودی سوخت و هوا در مشعل با احتراق ..... ۲۸
- جدول (۸-۳) میزان خطای سرعت در راستای عمودی ( $U_x$ ) برای محاسبات عددی در مقایسه با نتایج تجربی ..... ۳۲
- جدول (۹-۳) مشخصات ۲ نمونه مشعل مورد بررسی از نظر احتراق ..... ۳۲
- جدول (۱۰-۳) میانگین دما در میدان حل (فضای کوره) ..... ۳۳
- جدول (۱۱-۳) میانگین CO در خروجی مشعل ..... ۳۳



## فصل ۱ مقدمه

### ۱-۱- پیشگفتار

احتراق جزء جدایی‌ناپذیر سیستم‌هایی از قبیل توربین گاز، موتورهای احتراق داخلی، کوره‌ها و بویلرهای بخار می‌باشد که انرژی شیمیایی سوخت را به گرما تبدیل می‌کند. در سال‌های اخیر عواملی مانند شرایط زیست محیطی، هزینه‌های تولید و کیفیت محصولات تولیدی موجب شده است تا صنایع مختلف توجه ویژه‌ای به نوع سیستم‌های احتراقی مورد استفاده خود داشته باشند [۱].

کارایی سیستم‌های احتراق و میزان تولید آلاینده‌ی آن‌ها به طراحی محفظه احتراق بستگی دارد. نکته حائز اهمیت آنست که طراحی مناسب، نیازمند اطلاعاتی است که به کمک آن بتوان رفتار سیستم احتراقی را پیش‌بینی کرد. این اطلاعات از سه روش قابل دستیابی است: ۱- اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر در سیستم با شرایط واقعی و در حال کار ۲- مدلسازی فیزیکی آزمایشگاهی با ابعاد کوچک ۳- شبیه‌سازی سیستم مورد نظر با استفاده از روش‌های کامپیوتری. روش اول از نظر اجرا مشکل و هزینه‌بر است. روش دوم نسبت به روش اول راحت‌تر به نظر می‌رسد، اما نیازمند تجهیزات خاص و هزینه‌بر است. روش سوم که مدت‌هاست از آن استفاده می‌شود با صرف هزینه‌ی پایین، قابلیت انعطاف‌پذیری در شبیه‌سازی و قابلیت برآورد مفاهیم طراحی متعدد است. بنابر این می‌توان با شبیه‌سازی کامپیوتری سیستم‌های احتراق، به دیدگاه مناسبی از نظر عملکرد و نوع طراحی و پارامترهای آن دست پیدا کرد.

### ۱-۲- اختلاط سوخت و هوا

اختلاط سوخت و هوا که در احتراق و عملکرد سیستم مورد نظر نقش ویژه‌ای دارد، اختلاط سوخت و هوا باید به گونه‌ای باشد که واکنش شیمیایی احتراق به مناسب‌ترین و با کیفیت‌ترین شکل ممکن انجام گیرد. در واقع نسبت سوخت و هوا به شرایط استوکیومتری یک نزدیک باشد [۱].

توربولانس به تنهایی نمی‌تواند اختلاط را در حدی فراهم سازد که برای واکنش شیمیایی کافی باشد. هرگاه فاصله‌ی بین مولکول‌های سوخت و هوا کوچک‌تر از مسیر آزاد میانگین مولکول‌ها باشد، اختلاط به سطح مولکولی می‌رسد. فراهم کردن شرایطی که صرفاً تعدادی از مولکول‌های سوخت و هوا با یکدیگر تماس داشته باشند، کافی نیست. نسبت بین کسر جرمی سوخت و هوا نیز می‌بایست در یک محدوده‌ی معین قرار گیرد. در عمل، اختلاط سوخت و هوا در همه‌جای محفظه احتراق حالت بهینه ندارد.

مطالعات نشان می‌دهد که بازدهی احتراق، به میانگین زمان مورد نیاز جهت ایجاد یک مول از مخلوط سوخت-هوا به شدت وابسته است. جهت افزایش راندمان احتراق، به کاهش زمان اختلاط سوخت-هوا نیاز است [۱].

با افزایش دانش عمومی در مورد اثرات بلند مدت آلاینده‌های ناشی از احتراق بر محیط زیست، فشارها جهت کاهش انتشار آلاینده‌ها بر صنایع مختلف افزایش یافته‌است. در میان تمامی آلاینده‌های ایجاد شده؛  $CO$ ،  $NO_x$  و هیدروکربن‌های نسوخته<sup>۱</sup> از مهم‌ترین آن‌هاست. بسیاری از سیستم‌های احتراقی از جت‌های هوا با هدف بهبود اختلاط بین سوخت و هوا و در نتیجه، کاهش آلاینده‌هایی همچون  $CO$  و  $NO_x$  استفاده می‌کنند [۲].

جهت دستیابی به شعله‌ای با راندمان خوب در یک کوره، می‌بایست نسبت اختلاط هوا به سوخت را حد مناسبی نگه داشت. از لحاظ تئوریک، بهترین مخلوط متشکل از مقدار کافی هوا و در واقع مقدار کافی اکسیژن است تا بتواند سوخت گاز را بطور کامل بسوزاند. این مخلوط مناسب را مخلوط استوکیومتریک می‌نامند [۳].

در بحث احتراق بطور کلی دو نوع شعله وجود دارد؛ شعله‌های پیش‌آمیخته و غیر پیش‌آمیخته. تفاوت این دو نوع شعله در حالت اختلاط واکنش‌دهنده‌ها می‌باشد. در نوع پیش‌آمیخته، پیش از هرگونه واکنش شیمیایی سوخت و اکسیدکننده در سطح ملکولی با یکدیگر مخلوط می‌شوند. اما در نوع غیرپیش‌آمیخته، در ابتدا واکنش‌دهنده‌ها از یکدیگر جدا بوده و واکنش تنها در سطح مشترک سوخت و اکسیدکننده (جایی که اختلاط و واکنش هر دو صورت می‌گیرند)، انجام می‌گیرد [۳].

یکی از پارامترهای بسیار مهم در مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته، نوع و میزان اختلاط است. حرکت جریان هوا نقش مهمی در اختلاط هوا-سوخت و احتراق ایفا می‌کند. میزان اختلاط با پارامترهایی همچون کسر مخلوط بررسی می‌شود.

### ۳-۱- مشعل‌های جت قوی-جت ضعیف<sup>۲</sup>

مشعل‌های جت قوی-جت ضعیف، نسل جدیدی از مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته با  $NO_x$  کم بوده که با اختلاط کنترل شده‌ی هوا، سوخت و محصولات احتراق، دمای شعله‌ی کمتری ایجاد می‌کند. احتراق گاز طبیعی در شرایط استوکیومتریک یا نزدیک به آن، تقریباً به جریان هوای ده برابر جریان گاز نیاز دارد. بنابراین جت هوا، مومنتوم خروجی بیشتری نسبت به گاز دارد. به جت هوا، اصطلاحاً جت قوی و به جت سوخت گاز، جت ضعیف گفته می‌شود.

### ۴-۱- مروری بر کارهای تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی

بیلگر و بک<sup>۳</sup> [۴] در سال ۱۹۷۵ به بررسی تجربی و اندازه‌گیری میزان آلاینده خروجی از شعله‌های غیرپیش‌آمیخته در جت‌های آشفته پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که غلظت اکسیدهای نیتروژن<sup>۴</sup> در قسمتی که به شرایط استوکیومتریک نزدیک‌تر است، بیش‌تر بوده و همچنین قسمت عمده‌ی تولید  $NO_x$  در قسمت غنی از سوخت محفظه است. علاوه بر این، آن‌ها به

<sup>۱</sup>UHC: Unburned Hydrocarbons

<sup>۲</sup>SJWJ: Strong Jet/Weak Jet

<sup>۳</sup> Bilger and Beck

<sup>۴</sup> $NO_x$

بررسی شعله‌ی غیرپیش‌آمیخته عمودی در هوای ساکن نیز پرداختند. نتایج این آزمایش نشان داد که غلظت بالای  $\text{NO}_x$  در بخش نزدیک به شرایط استوکیومتریک بوده و این بیشینه غلظت، به ثابت زمانی جریان که می‌تواند معیاری از میزان اختلاط جریان باشد، بستگی ندارد.

بکر و بوث<sup>۵</sup> [۵] در سال ۱۹۷۵ به بررسی تجربی اختلاط در ناحیه واکنش دو جت دایروی با زوایای پاشش مختلف پرداختند. تابع همبستگی نوسانات غلظت گونه‌ها با سیال خروجی از نازل‌ها با استفاده از نتایج تجربی، محاسبه شده و این تابع بعنوان مشخصه‌ی مهمی از میدان اختلاط و مقیاس اختلاط مولکولی مشخص شد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که در جدایی کامل دو جریان، مقدار این تابع برابر ۱- بوده و به مرور زمان با تکمیل فرآیند اختلاط جریان‌ها، این مقدار مثبت می‌شود. همچنین با بررسی تأثیر فاصله‌ی طولی بین دو نازل جریان و تأثیر آن بر میزان اختلاط، مشخص شد که این فاصله یکی از پارامترهای همواره مناسب برای تعیین میزان اختلاط است و جهت دستیابی به اختلاطی بهتر، مقدار بهینه‌ای برای این طول وجود دارد که متناسب با زاویه پاشش و دیگر مشخصات جریان است.

وونینگ<sup>۶</sup> و همکاران [۶] در سال ۱۹۹۷ به مقایسه چند نمونه پاشنده در شعله غیرپیش‌آمیخته پرداختند. در پژوهش ایشان، قطر نازل و فاصله‌ی آن‌ها از هم و نحوه‌ی چیدمان نازل‌ها، پارامتری تأثیرگذار در پایداری و ایجاد احتراق بدون شعله بود. ایشان مطرح کردند که فاصله‌ی بین نازل‌های هوا باید بیشتر از دو برابر قطر سوراخ‌ها باشد. همچنین هندسه و طرز قرارگیری نازل‌ها می‌بایست به طوری باشد که محل تداخل جریان جت سوخت و هوا در فاصله‌ای بیشتر از ۶ برابر قطر سوراخ هوا قرار گیرد.

نحوه اختلاط گازها در محفظه احتراق و میزان تأثیر اختلاط در دمای شعله، نوسانات آن و تولید آلاینده  $\text{NO}_x$  توسط کاتسوک<sup>۷</sup> و همکاران [۷] در سال ۱۹۹۸ مورد بررسی قرار گرفت. ایشان نشان دادند که با ثابت نگه‌داشتن سایر عوامل و پارامترها و تنها با تغییر مکان پاشش سوخت، می‌توان میزان تولید  $\text{NO}_x$  را کاهش داد.

گراندمیسون<sup>۸</sup> و همکاران [۸] در سال ۱۹۹۸ با استفاده از تئوری جت‌ها و جریان‌های برشی به مطالعه دوبعدی جریان هوا و سوختو تداخل آن در کوره SJWJ پرداختند. ایشان روابطی برای تعیین محل تداخل دو جریان هوا و سوخت بدست آوردند. نتیجه‌ی پژوهش آن‌ها این بود که نسبت شار مومنوم جت سوخت به هوا، زاویه پاشش سوخت و فاصله جدایی بین نازل‌ها تنها عوامل مؤثر بر محل تداخل جریان دو جت می‌باشد.

ماهالوی و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۷ به بررسی تجربی پایداری شعله و میزان تولید آلاینده‌ی  $\text{CO}$  در مشعل با نازل مخروطی پرداختند. آن‌ها در کار خود، با تغییر میزان پیش اختلاط از طریق تغییر طول بخش اختلاط و زاویه‌ی خروجی نازل، به ابعاد هندسی بهینه جهت کاهش  $\text{CO}$  خروجی دست یافتند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه خروجی نازل از ۲۰ تا ۳۰ درجه، دمای شعله و میزان  $\text{CO}$  در بالاترین مقادیر قرار دارد. از طرفی با افزایش طول اختلاط، میزان آلاینده افزایش پیدا کرد. برای

<sup>5</sup> Becker and Booth

<sup>6</sup> Wunning

<sup>7</sup> Katsuki

<sup>8</sup>Grandmaison

دستیابی به احتراقی با آلاینده کمتر و دمای یکنواخت‌تر، می‌بایست طول اختلاط را ۵ برابر قطر ورودی سوخت و زاویه‌ی خروجی نازل را ۲۰ درجه قرار داد.

زادغفاری و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۲ به شبیه‌سازی عددی یک مشعل غیرپیش‌آمیخته جهت مطالعه بر روی زاویه پاشش سوخت گاز طبیعی از سرنازل به درون محفظه‌ی احتراق پرداختند. هدف آن‌ها دستیابی به عملکرد بهینه‌ی مشعل و کاهش آلاینده‌های تولیدی همچون CO بود. آن‌ها در طرح نازل خود با سه سوراخ پاشش سوخت، از مجموعه زوایای (۳۰-۴۵-۶۰)، (۸۰-۸۰-۸۰)، (۲۰-۲۰-۲۰)، (۳۰-۵۰-۷۰) و (۸۰-۸۰-۸۰) برای پاشش سوخت استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که در مجموعه زوایای (۳۰-۴۵-۶۰)، یکنواختی بیشتر دما و آلاینده‌ی کمتر مشاهده می‌شود. در مجموعه‌ی (۸۰-۸۰-۸۰) شعله در نقطه‌ی دورتری از سرنازل تشکیل شده و دما غیریکنواخت است؛ همچنین آلاینده‌ی بسیار زیادی تولید می‌شود. در مجموعه‌ی (۳۰-۵۰-۷۰)، یکنواختی دما مشاهده می‌شود، اما میزان آلاینده زیاد بوده و مطلوب نیست.

فرانزلی<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر اختلاط غیرکامل سوخت گاز طبیعی و هوا در ورودی محفظه‌ی احتراق یک مشعل پیش‌آمیخته و همچنین با جداسازی مسیر سوخت و هوا، به شبیه‌سازی احتراق غیرپیش‌آمیخته پرداختند. با بررسی‌های آزمایشگاهی مشخص شد که در احتراق پیش‌آمیخته؛ اختلاط غیرکامل و در واقع کمبود سوخت در مخلوط سوخت/هوا می‌تواند علت اصلی ناپایداری شعله شود و این مسئله در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از ۰٫۷ مشاهده می‌شود. آن‌ها همچنین با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۱۰</sup>، تأثیر اختلاط را برای احتراق غیرپیش‌آمیخته در محفظه احتراق مورد نظر خود بررسی کردند. با مقایسه تغییرات دمای ایجاد شده نسبت به کسر مخلوط‌های متفاوت، مشخص شد که بیشترین دماهای ایجاد شده، در محدوده‌ی کسر حدود ۰/۰۵ می‌باشد. این مقدار، تقریباً نزدیک به مقدار استوکیومتریک (که برای هوا و سوخت متان برابر ۰/۰۵۴۳ است)، بوده و نشان‌دهنده‌ی آنست که جهت دستیابی به احتراقی با دمای بالاتر، می‌بایست به اختلاطی دست یافت که به کسر مخلوط استوکیومتریک نزدیک‌تر باشد.

چو<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۳ به بررسی مشخصه‌های اختلاط با استفاده از پارامتر عدم اختلاط اصلاح شده<sup>۱۲</sup> و تأثیر آن بر میزان تولید NO<sub>x</sub> در مشعل‌های EV به روش عددی پرداختند. آن‌ها تغییراتی را در طرح مشعل ایجاد کرده تا به اختلاط یکنواخت‌تر سوخت و هوا و احتراقی با NO<sub>x</sub> کمتر دست یابند. یکی از این تغییرات، تزریق بخشی از سوخت از سوراخ‌های بالای مشعل بود که باعث کاهش عدم اختلاط (در واقع اختلاط بیش‌تر و بهتر) شد. همچنین با افزایش فاصله‌ی بین سوراخ‌های ورودی سوخت و هوا، مشاهده کردند که میزان NO<sub>x</sub> تولیدی کاهش پیدا کرد. در واقع به نظر می‌رسید که با افزایش زمان مورد نیاز جهت اختلاط، به اختلاطی یکنواخت‌تر و آلاینده‌ی کمتر رسیدند.

ژانگ<sup>۱۳</sup> و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ به بهینه‌سازی سیستم اختلاط گاز یک مشعل پیش‌آمیخته پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن هوا و گاز متان بعنوان دو سیال غیرنیوتونی و تراکم‌ناپذیر و با چشم‌پوشی از اثرات تشعشع، به شبیه‌سازی عددی مشعل

<sup>9</sup> Franzelli

<sup>10</sup> LES: Large Eddy Simulation

<sup>11</sup> Cho

<sup>12</sup> Modified Unmixedness

<sup>13</sup> Zhang

مورد نظر و سیستم اختلاط گاز آن پرداختند. همچنین از بررسی‌های تجربی یافتند که یکنواختی مخلوط در خروجی سیستم اختلاط تأثیر بسزایی بر تولید آلاینده‌ها دارد. جهت بهبود یکنواختی خروجی سیستم اختلاط، از ۱۱ صفحه‌ی اوریفیس توزیع کننده جریان و یک صفحه واگرا استفاده شده است. با قراردادن صفحه توزیع جریان اوریفیس، یکنواختی سرعت به اندازه‌ی ۲۳۴/۲٪ و اختلاط سوخت و گاز اجکتور ۲/۹٪ افزایش یافت. همچنین با بکارگیری از صفحه‌ی واگرا شونده، دبی جریان خروجی از اجکتورها و اختلاط سوخت و هوا افزایش پیدا کرد. در نهایت آن‌ها یک دستورالعمل کاربردی برای طراحی این نوع از مشعل‌های پیش‌آمیخته فراهم کردند که دور فن ورودی و قطر صفحه‌ی اوریفیس به چه میزان باشد تا اختلاط بهتر صورت گرفته و در نتیجه‌ی آن، آلاینده‌ی کمتری تولید شود.

ژائو<sup>۱۴</sup> و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی پارامترهای هندسی از قبیل موقعیت خروجی نازل و قطر آن در یک مشعل استوانه‌ای پیش‌آمیخته، پرداختند. در مشعل مورد نظر آن‌ها، سوخت گاز طبیعی از نازل مجزایی با فشار مشخصی به درون اجکتور پاشیده شده و به همین سبب، هوای اطراف را نیز به داخل اجکتور می‌کشد. سپس جریان مخلوط وارد محفظه‌ی دیگری شده که بعد از آن احتراق صورت می‌گیرد. نتایج نشان داد که در محفظه‌ی نهایی هرچه از خروجی اجکتور فاصله بگیریم، گاز بصورت یکنواخت‌تری توزیع شده است. آن‌ها اندازه‌ی بهینه‌ی قطر نازل پاشنده سوخت و موقعیت خروجی نازل را برای بهبود یکنواختی اختلاط و عملکرد کلی مشعل مورد نظر بدست آوردند. همچنین آن‌ها با بررسی‌های تجربی به این نتیجه رسیدند که ضریب بار که بصورت نسبت هوای واقعی به هوای تئوریک تعریف می‌شود، تأثیر بسیار بزرگی در تولید اکسید نیتروژن و کربن مونوکسید دارد. بطوریکه با افزایش این نسبت از ۱/۱۸ به ۱/۶۳، میزان تولید  $\text{NO}_x$ ؛ ۱۶ برابر کمتر شد. در نهایت با دستیابی به مقادیر بهینه‌ی موقعیت خروجی نازل، قطر نازل و ضریب هوای ورودی، تولید اکسید نیتروژن به کمتر از ۲۰ ppm و کربن مونوکسید به کمتر از ۵۰ ppm رسید.

منصور<sup>۱۵</sup> و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۷ به شبیه‌سازی جریان در یک مشعل با اختلاط جزئی و نازل مخروطی و تأثیرات ناحیه‌ی اختلاط بر ساختار و پایداری شعله، پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که طول بخش اختلاط و نسبت سرعت هوا به سوخت بر ناحیه‌ی اختلاط تأثیر چشم‌گیری دارد. در رژیم‌های جریان با رینولدزهای بالا، عدد رینولدز کمترین تأثیر را بر ناحیه‌ی اختلاط داشته؛ اما میزان آشفستگی جریان بر پایداری شعله تأثیرگذار است. در نهایت، با تغییرات طول اختلاط و قطر نازل سوخت، نسبت بهینه‌ی  $L/D=5$  برای این نوع از مشعل با هدف اختلاط بهتر و پایداری بیشتر شعله بدست آمد.

#### ۱-۵- اهداف تحقیق حاضر و ساختار کلی

با مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته مشاهده می‌شود که در سال‌های اخیر مطالعه بر روی نحوه اختلاط سوخت و هوا در مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته و به کارگیری روش‌های متفاوت جهت دستیابی به مخلوطی یکنواخت‌تر و احتراق همگن‌تر افزایش یافته است. هدف مطالعه حاضر بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مختلف در نحوه‌ی اختلاط سوخت و هوا و دستیابی به اختلاطی همگن‌تر است. به عنوان هدفی دیگر در پژوهش حاضر با هدف دستیابی به احتراقی با کیفیت بالاتر و آلاینده‌ی کمتر، تأثیر نحوه‌ی اختلاط در احتراق در نمونه‌ی مشعل غیرپیش‌آمیخته مورد بررسی قرار می‌گیرد.

<sup>14</sup> Xao

<sup>15</sup> Mansour

ساختار کلی پایان‌نامه بدین صورت است که در فصل جاری به اهمیت نحوه‌ی اختلاط سوخت و هوا در کیفیت احتراق و میزان تولید آلاینده‌هایی همچون CO پرداخته شده‌است. همچنین مروری بر کارهای پیشین و نتایج مهم آنها در دو دسته مطالعات عددی و آزمایشگاهی آورده شده است. در ادامه و در فصل دوم معادلات حاکم بر جریان واکنشی، فرضیات انجام شده در حل عددی، شرایط مرزی و چگونگی اعمال مدل‌های مورد استفاده در نرم‌افزار OpenFoam ذکر می‌شود. در فصل سوم نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و در انتها در فصل چهارم به جمع‌بندی مطالب ارائه شده و ذکر نتایج مهم بدست‌آمده به طور خلاصه پرداخته می‌شود. همچنین در فصل چهارم پیشنهاداتی جهت ادامه کار و مطالعات آتی آورده شده است.

## فصل ۲ معادلات حاکم و روش حل عددی

جریان‌های احتراقی در داخل کوره‌ها به‌طور عمومی از نوع جریان‌های توربولانسی هستند. در مطالعه حاضر، احتراق از نوع غیرپیش‌آمیخته است. در احتراق غیر پیش‌آمیخته جریان سوخت و اکسیدکننده از طریق ورودی‌های متفاوت وارد کوره می‌شوند و اختلاط کامل این دو جریان یکی از پارامترهای اساسی در ایجاد احتراق می‌باشد. بنابراین مدل‌سازی جریان اغتشاشی، در کنار مدل‌سازی احتراق دارای نقش مهمی است.

### ۲-۱- معادلات حاکم برای شبیه‌سازی جریان در محفظه‌ی مشعل

در این بخش معادلات حاکم، مدل‌های توربولانسی و روش عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان سرد با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز آپن‌فوم، ارائه می‌شود. معادلات حاکم شامل معادله بقای جرم، معادلات بقای مومنتم و معادلات بقای گونه‌ها است. در معادلات ارائه شده علامت (-) نشان‌دهنده‌ی متوسط‌گیری رینولدز و علامت ( $\sim$ ) نشان‌دهنده‌ی متوسط‌گیری جرمی است. لازم به ذکر است که در متوسط‌گیری رینولدز، هر کمیت مانند  $f$  را می‌توان به صورت مجموع یک ترم متوسط  $\bar{f}$  و یک ترم نوسانی  $f'$  به فرم  $f = \bar{f} + f'$  نوشت. در متوسط‌گیری جرمی نیز هر کمیت مانند  $f$  را می‌توان به صورت  $f = \bar{f} + f''$  نوشت که در آن  $\bar{f} = \frac{\rho f}{\rho}$  ترم متوسط جرمی و  $f''$  ترم نوسانی است. لازم به ذکر است که  $\bar{f}' = 0$  و  $\overline{\rho f''} = 0$  است. از آنجایی که در متوسط‌گیری رینولدز، ترم‌های غیرخطی همچون  $\rho'u'$  در معادلات ظاهر شده و محاسبات عددی را پیچیده‌تر می‌کند، غالباً از روش متوسط‌گیری جرمی استفاده می‌شود [۱۶].

### ۲-۱-۱- معادله پیوستگی

اصل اساسی که از آن در مکانیک سیالات استفاده می‌شود اصل بقاء جرم است. این اصل بیان می‌دارد که جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود و توسط معادله پیوستگی بیان می‌گردد.

معادله‌ی پیوستگی برای سیالات تراکم‌ناپذیر در جریان توربولانسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0 \quad (1-2)$$

در معادله (۱-۲)،  $\rho$  چگالی مخلوط و  $u_i$  مولفه‌های سرعت در سه جهت  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) است.

### ۲-۱-۲- معادله بقای مومنتم

معادله بقای مومنتم یا قانون دوم نیوتن بیان می‌کند که برآیند نیروهایی که بر یک جسم اثر می‌کند، با تغییرات خالص مومنتوم برابر است.

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{\rho u_i'' u_j''}}{\partial x_i} \quad (2-2)$$

در معادله (۲-۲)  $p$  معرف فشار و  $\tau_{ij}$  معرف تانسور لزجت است که به صورت رابطه (۳-۲) تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-2)$$

$\mu$  معرف لزجت دینامیکی برای جریان آرام است که مطابق رابطه (۴-۲) از قانون ساترلند بدست می‌آید:

$$\mu = A_s \frac{T^{3/2}}{T + T_s} \quad (4-2)$$

که در آن

$$A_s = 1.67212 \times 10^{-6}, T_s = 170.672$$

در معادله (۴-۲)،  $A_s$  ضریب ساترلند و  $T_s$  دمای ساترلند نامیده می‌شود. این قانون بر مبنای نظریه‌ی جنبشی گازهای ایده‌آل و نیروی بین مولکولی آن‌ها بنا نهاده شده است. قانون ساترلند به طور رایج کاربرد داشته و نتایج آن با خطای کمتر از یک درصد در طیف وسیعی از درجه حرارت قابل استفاده می‌باشد [۱۶].

ترم  $\overline{\rho u_i'' u_j''}$  را اصطلاحاً تنش توربولانسی یا تنش رینولدز می‌نامند. تنها تفاوت معادلات جریان آرام با آشفته نیز حضور همین ترم می‌باشد. تنش‌های رینولدزی با استفاده از تقریب بوزینسک مدل می‌شود.

$$\overline{\rho u_i'' u_j''} = \overline{\rho u_i'' u_j''} = -\mu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{2}{3} \bar{\rho} k \quad (5-2)$$

$$k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \overline{u_k'' u_k''} \quad (6-2)$$

$k$  انرژی جنبشی اغتشاشی و  $\mu_t$  معرف ویسکوزیته توربولانسی است که از مدل توربولانسی بدست می‌آید.



۲-۱-۳- معادله بقای گونه‌ها

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{Y}_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{Y}_k) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{V_{k,i}Y_k} + \bar{\rho}\overline{u_i''Y_k''}) - \bar{\omega}_k \quad ; k = 1, N \quad (7-2)$$

در معادله (۷-۲) پارامترها و ترم‌های مختلف به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$Y_k$  کسر جرمی گونه‌ها و ترم  $\bar{\rho}\overline{u_i''Y_k''}$  شار توربولانسی مربوط به گونه‌هاست که به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\bar{\rho}\overline{u_i''Y_k''} = -\frac{\mu_t}{Sc_{kt}} \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \quad (8-2)$$

در رابطه (۸-۲)  $Sc_{kt}$  عدد اشمیت توربولانسی برای گونه  $k$  ام می‌باشد.  $\bar{\omega}_k$  نیز نرخ تولید یا مصرف گونه‌ی  $k$  ام است که از مدل احتراقی برآورد شده و در شبیه‌سازی جریان سرد، این ترم حذف می‌شود. در مطالعه حاضر، با توجه به شرایط حل عددی مسئله‌ی مرجع [۱۷] عدد اشمیت توربولانسی برابر  $0/8$  قرار داده شده‌است.

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (9-2)$$

ترم  $\overline{V_{k,i}Y_k}$  نشان‌دهنده شار نفوذی آرام است و به صورت معادله (۱۰-۲) مدل می‌شود:

$$\overline{V_{k,i}Y_k} = -\overline{\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}} \approx -\bar{\rho} \bar{D}_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \quad (10-2)$$

$\bar{D}_k$  ضریب نفوذ مولکولی متوسط گونه‌هاست.

$V_{k,i}$  مؤلفه  $i$  ام سرعت نفوذ گونه  $k$  بوده و  $\sum_{k=1}^N V_{k,i}Y_k = 0$  است [۱۶].

۲-۱-۴- معادله بقای انرژی :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{h})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{h}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} \right] + S_h + \bar{\omega}_T \quad (11-2)$$

که در آن

$$\tilde{h}(T) = \int_{T_{ref}}^T \bar{c}_p(T) dT + \sum \tilde{Y}_k \Delta \tilde{h}_k^0(T_{ref}) \quad (12-2)$$

$$\frac{D\bar{p}}{Dt} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + u_i \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + u_i'' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \quad (13-2)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (14-2)$$

در مطالعه حاضر عدد پرانتل<sup>۱۶</sup> توربولانسی برابر ۰/۸۵ قرار داده شده است.

جهت محاسبه‌ی ظرفیت گرمایی ویژه ( $C_{p,k}(T)$ ) در فشار ثابت برای گونه‌ی  $k$ ام از یک تابع چند جمله‌ای وابسته به دما مطابق معادله‌ی (۱۵-۲) استفاده شده است. ضرایب این چند جمله‌ای از جداول استاندارد ترمودینامیکی بدست می‌آیند.

$$\frac{C_{p,k}(T)}{R} = a_{1,k} + a_{2,k}T + a_{3,k}T^2 + a_{4,k}T^3 + a_{5,k}T^4 \quad (15-2)$$

$$\bar{C}_p = \sum_k^N Y_k C_{p,k}(T)$$

در معادله بقای انرژی  $\dot{\omega}_T$  نشان دهنده حرارت آزاد شده از احتراق است:

$$\dot{\omega}_T = - \sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^0 \dot{\omega}_k \quad (16-2)$$

هدف از مدل‌سازی جریان آشفته، تعیین ترمهائی از قبیل تنش رینولدز، شار جرمی آشفته و یا شار حرارتی آشفته با استفاده

از ارتباط دادن مقادیر کمیت‌های مزبور به کمیت‌های جریان متوسط و بالاخص گرادیان‌های موجود در جریان متوسط می‌باشد [۱۶].

## ۲-۱-۵- معادله حالت گاز ایده‌آل

معادله حالت گاز ایده‌آل با صرف‌نظر از نیروهای بین‌مولکولی در مخلوط گازی و فرض برقراری قانون گاز ایده‌آل چگالی

مخلوط به صورت تابعی از فشار، دما و غلظت گونه‌ها بدست می‌آید.

$$p_k = \frac{\rho_k RT}{MW_{mix}} \quad (17-2)$$

در معادله‌ی حالت گاز ایده‌آل،  $MW_{mix}$  و  $R_u$  به ترتیب وزن مولکولی مخلوط و ثابت جهانی گازها هستند.

$$\frac{1}{MW_{mix}} = \sum_{k=1}^N \frac{Y_k}{MW_k} \quad (18-2)$$

<sup>16</sup>Prandtl number

## ۲-۱-۶- مدل سازی اغتشاش

معادلات ناویراستوکس، یکی مدل ریاضی کامل برای سیال ارائه می‌دهند. به دلیل پیچیده بودن این معادلات در فرم کامل ناویراستوکس، حل تحلیلی غیرممکن است، بنابراین روش های عددی به کمک رایانه بهترین گزینه برای حل بخشی از این معادلات می‌باشند. پیشرفت سریع در زمینه تکنولوژی رایانه در چند دهه اخیر باعث استفاده گسترده دینامیک سیالات محاسباتی در حل عددی مسائل جریان سیال شده است. با توجه به اینکه تمامی حل کننده های معادلات ساده شده ناویراستوکس نیازمند زمان پردازش و حافظه زیادی می‌باشند، بنابراین مقداری ساده سازی در حل این معادلات ناویراستوکس برای کاهش منابع محاسباتی مورد احتیاج، لازم است. مدل های آشفتگی هم دراصل ماحصل ساده سازی های قابل توجه بر روی معادلات ناویراستوکس هستند.

شبیه سازی عددی فرآیندهای احتراقی آشفته همانند سایر جریان های آشفته، به طور عمده با استفاده از سه روش: معادلات متوسط گیری شده ی زمانی ناویراستوکس (RANS<sup>۱۷</sup>)، شبیه سازی گرايه های بزرگ (LES<sup>۱۸</sup>) و شبیه سازی مستقیم عددی (DNS<sup>۱۹</sup>) صورت می پذیرد. اگرچه اولین ابزار شبیه سازی عددی جریان های احتراقی ناپایای چند بعدی، استفاده از شبیه سازی مستقیم عددی و حل تمام مقیاس های وابسته از ضخامت شعله آرام تا اندازه سیستم (مقیاس انتگرالی) می باشد، اما نیاز به شبکه محاسباتی بسیار ریز و توان رایانه ای بسیار بالا استفاده از این مدل را به هندسه های آزمایشگاهی و سیستم های موازی شده بسیار قوی محدود می کند. از اینرو برای مدل سازی یک سیستم احتراقی واقعی رویکردهای RANS و LES در حال حاضر به نظر تنها راه ممکن می باشند. در این دو رویکرد از معادلات حاکم به ترتیب، متوسط گیری زمانی و مکانی می شود. به دنبال این متوسط گیری جمله های نامعلومی در معادلات ظاهر می شوند که باید با استفاده از مدل های کمکی تعیین شوند تا در نهایت معادلات حاکم به شکل بسته درآیند. این مدل ها شامل یک مدل توربولانسی برای توصیف دینامیک سیال (تنش های رینولدزی)، یک مدل احتراقی برای بیان نرخ واکنش متوسط گیری شده و روابطی برای تعیین شارهای گونه های شیمیایی و آنتالپی (شارهای رینولدزی)، می باشند [۱۸].

روش RANS تمامی گردابه ها را مدل می کند و به حل مستقیم آن ها می پردازد. در نتیجه این روش هزینه محاسباتی ناشی از شبکه ی محاسباتی ریز را کاهش می دهد، اما به دلیل کم شدن دقت حل، پدیده های با مقیاس زمانی و مکانی کوچک به خوبی مدل نمی گردند. مدل های RANS به سه دسته کلی روش های صفر معادله ای، یک معادله ای و دو معادله ای تقسیم می شوند. به دلیل دقت پایین روش های صفر معادله ای و یک معادله ای، عموماً از روش های دو معادله ای استفاده می شود [۱۸].

برای شبیه سازی فرآیند احتراق در کار حاضر، به دلیل بزرگ بودن هندسه و کاهش هزینه محاسباتی برای مدل سازی اغتشاش روش های DNS و LES کاربرد نداشته و از روش متوسط گیری زمانی استفاده می شود.

17 Reynolds Averaged Navier-Stokes  
18 Large Eddy Simulation  
19 Direct Numerical Simulation

در کار حاضر با توجه به اینکه نازل‌های سوخت و هوا در مشعل از نوع غیر چرخشی است و بازچرخش‌های نسبتاً کمی درون کوره وجود دارد و همچنین با توجه به برخی کارهای انجام شده مشابه (به عنوان نمونه می‌توان به مطالعه یمر همکارانش اشاره کرد [۱۷]) بر روی این کوره آزمایشگاهی، از مدل توربولانسی  $k - \varepsilon$  standard که توانایی خوبی در شبیه‌سازی چنین جریان‌هایی دارد استفاده شده است.

## ۱-۶-۱-۲ مدل $k - \varepsilon$ Standard

مدل  $k - \varepsilon$  Standard معروف‌ترین مدل دو معادله ای می‌باشد. زیرا درک آن نسبت به سایر مدل‌ها آسان‌تر و استفاده از آن در برنامه‌نویسی ساده‌تر می‌باشد. مدل توربولانسی  $k - \varepsilon$  Standard با وجود محدودیت‌هایی که دارد، به‌طور گسترده در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل برای جریان‌های پیچیده شامل وجود گرادیان شدید فشار، جدایش و انحنای شدید خطوط جریان عملکرد ضعیفی دارد. در این مدل میدان آشفتگی بر حسب دو متغیر بیان می‌شود.

الف) انرژی جنبشی جریان آشفته  $K^{20}$

ب) نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته  $\varepsilon^{21}$

در مدل استاندارد  $k - \varepsilon$  مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  توسط معادله‌های نیمه تجربی زیر بدست می‌آیند:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \bar{\rho}\varepsilon \quad (19-2)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (20-2)$$

در روابط (۱۹-۲) و (۲۰-۲)  $P_k$  ترم تولید انرژی جنبشی اغتشاشی است که به صورت معادله (۲۱-۲) تعریف می‌شود.  $\sigma_k$ ،  $C_{\varepsilon 1}$ ،  $C_{\varepsilon 2}$  و  $\sigma_\varepsilon$  ثوابت تجربی معادله هستند که مقادیر آنها در جدول (۱-۲) [۱۷] ارائه شده است. در نهایت لازم به ذکر است که در مدل‌های توربولانسی ویسکوزیته توربولانسی از رابطه (۲۲-۲) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$P_k = -\bar{\rho} \widetilde{u'_i u'_j} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (21-2)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (22-2)$$

جدول (۱-۲) ثوابت مدل  $k - \varepsilon$  Standard

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1.44	1.92	1	1.3

<sup>20</sup>Turbulent Kinetic Energy

<sup>21</sup>Viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy

## ۲-۱-۷- مدل سازی احتراق

از دهه ۱۹۶۰ دینامیک سیالات محاسباتی به طور عملی قادر به شبیه سازی فرآیندهای احتراقی شد. برای این مهم باید در معادله متوسط گیری بقای گونه ها، ترم نرخ واکنش شیمیایی ( $\dot{\omega}$ ) مدل شود [۱۹]. اگرچه در شبیه سازی جریان های احتراقی آرام، جمله نرخ واکنش با دقت خوبی توسط مدل آرنیوسی، که برای واکنشی تک مرحله ای تابعی به شکل زیر است، بیان می شود:

$$\dot{\omega} = -A\rho Y T^b e^{-Ea/RT}, \quad (۸-۲)$$

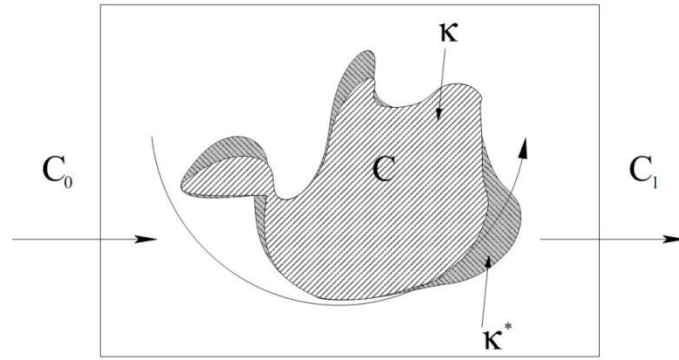
اما در بررسی احتراق آشفته، مهم ترین و چالش برانگیزترین موضوع مدل سازی نرخ واکنش شیمیایی متوسط  $\bar{\dot{\omega}}_k$  می باشد. در رابطه فوق  $A$  ضریب پیش نمایی یا ضریب فرکانس،  $b$  ضریب ثابت و  $Ea$  انرژی فعال سازی می باشند. به علت ماهیت بسیار غیر خطی نرخ واکنش آرنیوسی از لحاظ ریاضی نمی توان مقدار نرخ واکنش متوسط را به صورت تابعی از مقادیر متوسط متغیرهای مربوطه بیان کرد، یعنی:  $\bar{\dot{\omega}} \neq \dot{\omega}(\bar{\rho}, \bar{T}, \bar{Y})$ . عدم توجه به این امر منجر به خطاهای غیر قابل قبول می شود. از طرفی نرخ واکنش آرنیوسی یک نرخ واکنش وابسته به شیمی بوده و وابستگی موجود مابین نرخ واکنش و اختلاط در مقیاس های کوچک را لحاظ نمی کند [۲۰].

برای غلبه بر این مشکل مدل های مختلفی توسط محققین در چهار دهه اخیر ارائه شده است. در کار حاضر از مدل واکنش گاه نیمه مخلوط<sup>۲۲</sup> (PaSR) استفاده می شود.

## ۲-۱-۷-۱ مدل واکنش گاه نیمه مخلوط (PaSR)

این مدل بر مبنی مدل EDC شکل گرفته و هر سلول محاسباتی به دو ناحیه واکنشی و غیرواکنشی همگن تقسیم می شود. بنابراین غلظت متوسط در سلول در اثر تبادل جرم بین ناحیه واکنشی و غیرواکنشی تغییر می کند. در این مدل نیز ناحیه واکنشی به صورت یک واکنش گاه اختلاط ایده آل (PSR) در نظر گرفته می شود [۲۰]. در این ناحیه یک ترکیب همگن وجود دارد، یعنی فرض می شود که هر گونه به طور کامل با گونه های دیگر مخلوط شده است. طرحواره ای از یک سلول محاسباتی در مدل PaSR که به صورت یک واکنش گاه نیمه مخلوط فرض شده، مشاهده می شود.  $C_0$  متوسط غلظت ورودی به سلول،  $C$  غلظت نامعلوم در ناحیه واکنشی زیر شبکه،  $C_1$  متوسط غلظت زمانی در خروجی سلول و برابر با متوسط غلظت در کل سلول و  $k^*$  کسر جرمی مخلوط واکنشی می باشند.

<sup>22</sup> Partially Stirred Reactor



شکل (۱-۲) یک واکنشگاه نیممخلوط PaSR (که از سه ناحیه غیرپیش آمیخته، پیش آمیخته و پیش آمیخته واکنشی تشکیل شده

است) [۲۰]

با توجه به تعاریف فوق می توان نوشت که:

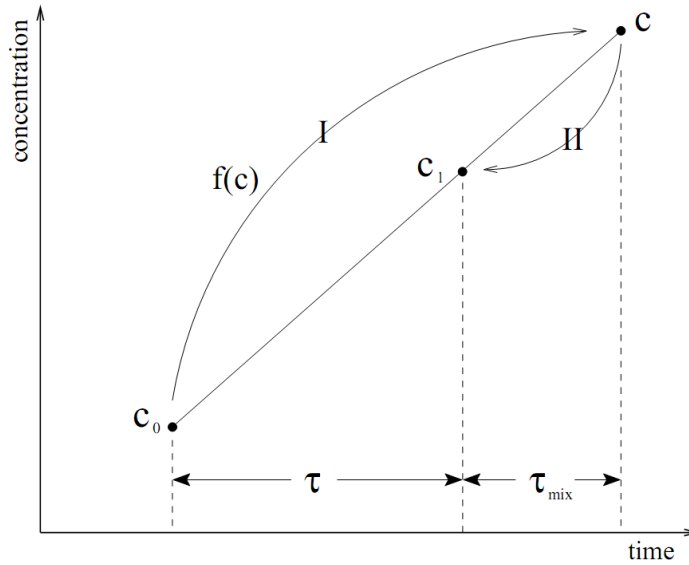
$$C_1 = \kappa^* C + (1 - \kappa^*) C_0 \quad (۲۳-۲)$$

کل فرآیند روی داده در یک واکنشگاه PaSR را می توان به دو مرحله که به دنبال هم به پیش می روند تقسیم کرد. همان طور که در شکل (۱-۲) مشاهده می شود در مرحله اول غلظت اولیه در ناحیه واکنشی از  $C_0$  به  $C$  تغییر می کند. در مرحله دوم مخلوط واکنش داده با غلظت  $C$  در اثر حرکت های آشفته با مخلوط واکنش نداده با غلظت  $C_0$  مخلوط شده و غلظت متوسط  $C_1$  به دست می آید. از آنجایی که  $C_1$  غلظت اولیه سلول در زمان محاسباتی بعدی می باشد، اختلاف زمان بین  $C_0$  تا  $C_1$ ،  $\tau$ ، برابر گام زمانی حل می باشد. اختلاف زمان بین  $C_1$  تا  $C$ ،  $\tau_{mix}$ ، نیز مقیاس زمانی مشخصه آشفته می باشد. کل زمان فرآیند احتراق آشفته نیز از مجموع زمان های واکنش و اختلاط (زمان اختلاط مولکولی یا زمان مشخصه شکست گردابه) حاصل می شود. با توجه به شکل (۲-۲) مشاهده می شود که نرخ مرحله های اختلاط و واکنش در این حالت برابر فرض می شود پس می توان نوشت:

$$f_r(c) = \frac{c_1 - c_0}{\tau} = \frac{c - c_1}{\tau_{mix}} \quad (۲۴-۲)$$

$$f_r(c) = (v_r'' - v_r') \dot{\omega}_r(c) \quad (۲۵-۲)$$

$\dot{\omega}_r$  نرخ پیشرفت واکنش  $r$  ام و  $v_r''$  و  $v_r'$  ضرایب استوکیومتری واکنش های رفت و برگشت می باشند.



شکل (۳-۲) دومرحله واکنش و اختلاط در یک واکنشگاه PaSR [۲۰]

برای محاسبه کسر واکنشی سلول محاسباتی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\kappa^* = \frac{\tau_{ch}}{\tau_{mix} + \tau_{ch}}, \quad (26-2)$$

بنابراین نرخ واکنش متوسط گونه  $k$  ام از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{c_k^1 - c_k^0}{dt} = \bar{\omega}_k = \kappa^* \dot{\omega}_k \quad (27-2)$$

در ویرایش اولیه این مدل که توسط کُمیاک (Chomiak) و کارلسون (Karlsson) ارائه شده مقیاس زمانی اختلاط از

متوسط‌گیری هندسی بین مقیاس زمانی تیلور (Taylor) و مقیاس زمانی کولموگوروف (Kolmogorov) محاسبه شده است [۲۰]:

$$\tau_{mix} = \sqrt{\tau_t \tau_k} = \sqrt{\frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2}} = \frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{1}{Re_t}\right)^{1/4} \quad (28-2)$$

مقیاس زمانی تیلور ( $k/\varepsilon$ ) بیانگر زمان مورد نیاز برای شکست گردابه‌های بزرگ مقیاس تا مقیاس کولموگوروف، و مقیاس

زمانی کولموگوروف  $\tau_k$ ، بیانگر زمان مورد نیاز برای اندرکنش مولکولی محلی (اختلاط مولکولی) مورد نیاز برای واکنش‌ها است. در

بعضی مراجع از متغیر تنظیم کننده‌ای برای افزایش دقت رابطه (۱۴-۲) استفاده شده است [۲۰]:

$$\tau_{mix} = \left(2 \sqrt{C_\mu} \frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2}\right)^{1/2} = \frac{k}{\varepsilon} \left(\frac{C_\mu}{Re_t}\right)^{1/4} \quad (29-2)$$

$C_{\mu}$  همان ثابت مدل  $k-\varepsilon$  و برابر  $0.09$  می‌باشد. بعضی محققان استفاده از مقیاس زمانی تیلور را به جای رابطه (۲-۱۴) برای محاسبه  $\tau_{mix}$  ترجیح داده‌اند [۲۰]:

$$\tau_{mix} = C_{mix} \frac{k}{\varepsilon}, \quad (30-2)$$

ثابت  $C_{mix}$  بسته به جریان می‌تواند مقداری در حدود  $0.3-0.101$  را داشته باشد. انتخاب رابطه  $\tau_{mix}$  وابستگی زیادی به جریان و مکانیزم شیمیایی مورد استفاده خواهد داشت. در حلگر ReactingFoam از بسته نرم افزاری OpenFoam نیز رابطه زیر برای محاسبه  $\tau_{mix}$  استفاده شده است:

$$\tau_{mix} = C_{mix} \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\rho \varepsilon}}. \quad (31-2)$$

برای محاسبه مقیاس زمانی واکنش کلی نیز گُمیاک و کارلسون رابطه زیر را پیشنهاد داده‌اند [۲۰]:

$$\frac{1}{\tau_{ch}} = \max \left\{ \frac{-\dot{\omega}_F}{\rho Y_F}, \frac{-\dot{\omega}_{O_2}}{\rho Y_{O_2}} \right\}, \quad (32-2)$$

## ۲-۱-۸- مکانیزم شیمیایی<sup>۲۳</sup>

جهت محاسبه ترم تولید یا مصرف در معادله انتقال گونه‌ها، نیاز به شناخت واکنش‌های شیمیایی دخیل در احتراق است. بدین منظور آزمایشات فراوانی انجام شده است تا واکنش‌های رخ داده در احتراق سوخت‌های مختلف و نرخ واکنش گونه‌های دخیل مشخص گردد. اکثر واکنش‌های احتراقی از طریق تعدادی از واکنش‌های ابتدایی که با هم منجر به یک واکنش کلی می‌شوند اتفاق می‌افتد. واکنش‌های ابتدایی با هم یک سینتیک واکنش را تشکیل می‌دهند. سینتیک احتراق می‌تواند شامل صدها واکنش ابتدایی باشد. برای مثال در احتراق متان و هوا تا  $352$  واکنش بنیادی و  $53$  گونه مشخص شده است. استفاده از سینتیک با جزئیات در محاسبات عددی (CFD) به علت داشتن زمان محاسبات بالا به منظور حل دستگاه بزرگی از معادلات مختلف مربوط به همان سینتیک، تقریباً غیرممکن است. به همین علت در این حالت از سینتیک کلی یا کاهش یافته در شبیه‌سازی استفاده می‌کنیم. سینتیک‌های کلی یا کاهش یافته روند کلی سینتیک با جزئیات را با کاهش تعداد واکنش‌ها پیش‌بینی می‌کنند. در شبیه‌سازی احتراق مورد نظر، از سینتیک کلی دو مرحله‌ای که دقت قابل قبولی در محاسبه گونه‌های تولیدی و واکنش احتراق دارد، استفاده می‌شود [۲۱]:



<sup>23</sup>Chemical mechanism



## ۲-۱-۹- مدل سازی تشعشع

انتقال حرارت تشعشعی بوسیله گسیل انرژی با امواج الکترومغناطیسی انجام می‌گیرد که به صورت یک ترم چشمه در معادله انرژی ظاهر می‌شود. برای محاسبه انتقال حرارت تشعشعی لازم است که معادله انتقال تشعشعی<sup>۲۴</sup> (RTE) حل شود. این معادله نرخ تغییرات شدت تابش یک باریکه طیفی، در یک جهت خاص را توصیف می‌کند و به صورت رابطه (۲-۳۳) نمایش داده می‌شود [۲۲]:

$$\frac{dI_{\lambda}(r, s)}{ds} = -\kappa_{\lambda}I_{\lambda}(r, s) + \kappa_{\lambda}I_{b\lambda}(r) - \sigma_{s\lambda}I_{\lambda}(r, s) + \frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(r, s^*) \Omega(s^*, s) d\Omega^* \quad (2-34)$$

در رابطه (۲-۳۳)،  $I_{\lambda}$  شدت تشعشع طیفی در نقطه  $r$  است که در جهت  $S$  منتشر می‌شود،  $S$  جهت مختصات است،  $K$  ضریب جذب و  $\sigma_s$  ضریب پراکندگی محیط و  $\Omega(s^*, s)$  تابع فاز پراکندگی است. زیرنویس‌های  $b$  و  $\lambda$  به ترتیب به جسم سیاه و طول موج اشاره دارد. شدت تشعشع طیفی  $I_{\lambda}$ ، مقدار انرژی دریافتی از تشعشع طول موج‌های مختلف است که در واحد سطح جسم در واحد زاویه فضایی بر واحد طول موج اندازه‌گیری می‌شود.

ترم سمت چپ معادله انتقال حرارت تشعشعی بیان‌کننده نرخ تغییرات شدت تشعشع طیفی پرتوی تشعشعی ناشی از نشر و جذب و پراکندگی (اگر ذرات جامد مانند ذرات جامد حضور داشته باشند) بوسیله محیط شرکت‌کننده می‌باشد. اولین ترم سمت راست نشان‌دهنده کاهش شدت تشعشع در داخل حجم کنترل ناشی از جذب انرژی تشعشعی در محیط است. نرخ تغییرات شدت تشعشع طیفی ناشی از جذب با شدت تشعشع طیفی متناسب مستقیم دارد، ضریب تناسب  $\kappa_{\lambda}$  به‌عنوان معکوس متوسط فاصله‌ای است که فوتون طی می‌کند تا بوسیله محیط جذب شود. این پارامتر جزء خواص محیط بوده که به دما، فشار کل، کسر مولی گونه‌های جذب‌کننده و همچنین طول موج وابسته است. دومین ترم در سمت راست معادله (۲-۳۳) نشان‌دهنده افزایش انرژی تشعشعی در داخل حجم کنترل ناشی از انتشار تشعشع از محیط است که به طور مستقیم با شدت تشعشع طیفی جسم سیاه در دمای محیط در داخل حجم کنترل متناسب است. ضریب تناسب در این مورد همچنان همان ضریب تناسب مربوط به جذب می‌باشد. و در نهایت دو ترم آخر معادله RTE ناشی از پراکندگی تشعشع در داخل حجم کنترل در جهات مختلف از  $S$  می‌باشد [۲۲].

معادله انتقال حرارت تشعشعی، شدت انتقال حرارت تشعشعی در یک جهت مخصوص و در یک طول موج به خصوص را توصیف می‌کند. با ساده‌سازی معادله RTE و انتگرال‌گیری از آن در همه جهات فضایی  $4\pi$  و در همه طول موج‌های ممکن، به رابطه (۲-۳۵) می‌رسیم:

$$-\nabla \cdot q = \kappa G - 4\kappa\sigma T^4 \quad (2-35)$$

در رابطه (۲-۳۴)  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن بوده و برابر با  $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4]$  است. می‌توان نشان داد که تلفات تشعشعی در دماهای پایین به دلیل کوچک بودن مقدار  $\sigma$  قابل صرف‌نظر کردن است؛ به‌رحال تلفات حرارتی تشعشعی نقش

<sup>24</sup>Radiative Transfer Equation

مهمی در دماهای خیلی بالا ایفا می‌کند. در ترم چشمه تشعشعی از اثرات پراکندگی صرف‌نظر می‌شود. علاوه بر این ضریب جذب مستقل از تغییر طیف  $\lambda$  بوده و در نتیجه برای محیط خاکستری  $k = k_{\lambda}$  می‌باشد. در نتیجه ترم چشمه معادله انرژی براساس تلفات حرارتی تشعشعی به صورت زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$S_{rad} = -\nabla \cdot q = \kappa G - 4\kappa\sigma T^4 \quad (۳۶-۲)$$

شدت کل تشعشعی  $G$  به‌سادگی قابل محاسبه نبوده و روش‌های مختلفی جهت حل معادله انتقال تشعشعی ارائه شده است که دقیق‌ترین‌ها مربوط به مسائل یک‌بعدی، با خواص ثابت و بدون در نظر گرفتن پراکندگی می‌باشد.

مدل P-1 یک معادله انتقال تشعشعی اضافی حل می‌کند و بنابراین هزینه‌ی محاسباتی زیادی ندارد. برای استفاده در کار حاضر به علت ساده بودن هندسه این مدل انتخاب مناسبی است. در نهایت مدل تشعشعی P-1 انتخاب شد زیرا که این مدل مناسبی برای کار حاضر است و همچنین از نظر محاسباتی نسبت به سایر مدل‌ها کم هزینه‌تر است.

در تقریب P1 معادله RTE برای محیط خاکستری و بدون پراکندگی به صورت معادله زیر ساده می‌شود. این روش دارای دقت قابل قبول و هزینه محاسباتی پایینی می‌باشد.

$$q = -\frac{1}{3\kappa_{\lambda}} \nabla G \quad (۳۷-۲)$$

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{3\kappa_{\lambda}} \nabla G \right) = \kappa G - 4\kappa\sigma T^4 \quad (۳۸-۲)$$

در نرم‌افزار OpenFoam امکان استفاده از مدل‌های P1 و جهات مجزا<sup>۲۵</sup> برای تشعشع وجود دارد. همچنین لازم به ذکر است که حل گر ReactingFoam در حالت پیش‌فرض تشعشع را اعمال نمی‌کند. با اضافه کردن ترم چشمه به معادله انرژی، و استفاده از حل گر ReactingFoamRad این مدل اعمال می‌شود.

## ۲-۲- روش حل عددی

در کار حاضر برای شبیه‌سازی رژیم احتراقی از نرم‌افزار متن باز OpenFoam استفاده شده است. این نرم‌افزار، دارای کتابخانه قدرتمندی از انواع روش‌های عددی و مدل‌های مورد استفاده در سیالات می‌باشد که برای حل بسیاری از مسائل پیچیده جریان سیال شامل واکنش‌های شیمیایی، توربولانس و انتقال حرارت بکار می‌رود. مهم‌ترین ویژگی نرم‌افزار OpenFoam در مقایسه با سایر نرم‌افزارهای تجاری CFD مثل Ansys و Fluent دسترسی آسان به برنامه‌های موجود در نرم‌افزار می‌باشد.

در این پایان‌نامه از روش گسسته‌سازی زمانی با استفاده از روش مرتبه اول اوبلر و گسسته‌سازی مکانی سرعت با استفاده از تفاضل مرکزی انجام شده است. همچنین برای تصحیح فشار از الگوریتم PIMPLE و با تعداد تکرار خارجی<sup>۲۶</sup> حل گر یک استفاده شده که مشابه مدل PISO با یک مرحله پیش‌بینی و دو مرتبه تصحیح عمل می‌کند. این روش، در واقع بسط روش SIMPLE با یک مرحله تصحیح اضافه است [۲۳]. این الگوریتم از روش‌هایی همچون SIMPLER یا SIMPLEC، روند همگرایی قوی‌تری داشته و

<sup>25</sup>Discrete Ordinates (DO)

<sup>26</sup>nOuterCorrectors

مراحل محاسباتی کمتری دارد. جهت بررسی نتایج محاسبات کمیت‌های مختلف، از حد باقی‌مانده‌ی  $1e-6$  استفاده شده است که جهت همگرا شدن محاسبات مورد نظر قابل قبول است. در بررسی جریان سرد از گام زمانی  $1e-4$  تا  $1e-3$  s و در جریان احتراقی از  $1e-6$  تا  $1e-5$  s استفاده شده است.

### ۳-۲- جمع‌بندی

در این فصل، معادلات حاکم بر جریان سیال برای مدل سازی جریان سرد بدون واکنش شیمیایی و جریان احتراقی همراه با فرضیات در نظر گرفته شده، ارائه گردید. روش‌های حل عددی و تکنیک‌های خاص مورد استفاده بیان شد. از مدل توربولانسی Standard K- $\epsilon$ ، احتراقی PaSR، تشعشعی P1، سینتیک شیمیایی کلی دو مرحله‌ای و حل‌گر ReactingFoam در نرم‌افزار OpenFoam نسخه ۴,۱ استفاده شده است. با توجه به روابط و فرضیات ذکر شده، در فصل سوم به شبیه‌سازی جریان سرد و احتراقی در مشعل مورد نظر برای شرایط هندسی مختلف پرداخته می‌شود.

### فصل ۳ نتایج

جهت مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی در مشعل‌ها با شرایط متفاوت عملکرد و الگوهای متفاوت جریان، دینامیک سیالات محاسباتی به کار گرفته شده است. در این فصل با استفاده از نرم‌افزار متن باز اپن فوم، یک مشعل با یک جفت ورودی هوا و سوخت با فاصله‌ی مشخصی از یکدیگر، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین تأثیر پارامترهای هندسی از قبیل: زاویه پاشش سوخت و هوا، قطر نازل ورودی سوخت و تعداد پاشنده‌های سوخت و هوا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

تمام محاسبات با استفاده از مجموعه کتابخانه‌های نرم‌افزار OpenFoam نسخه ۴٫۱ تحت سیستم عامل لینوکس با سیستمی دارای ۲۴ پردازشگر موازی انجام شده است. مدت زمان اجرای هر برنامه و پایدار شدن جواب‌ها در حالت جریان سرد بطور میانگین ۳ روز و در حالت جریان احتراقی، ۶-۷ روز می‌باشد.

#### ۱-۳- مشخصات مشعل شبیه‌سازی شده با جریان سرد

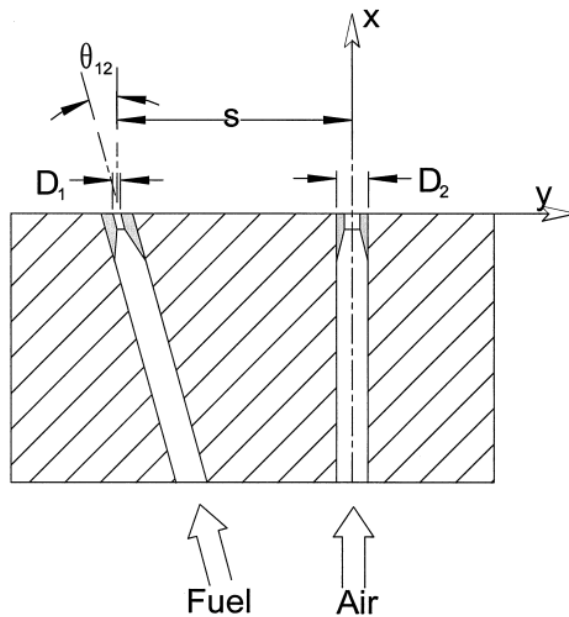
جهت مطالعه رژیم جریان سرد از مشعل نوع جت قوی/جت ضعیف<sup>۲۷</sup> ارائه شده توسط یمر و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۱ استفاده شده است.

در مشعل جت قوی/جت ضعیف، نازل‌های ورودی سوخت و هوا جدا از هم و در موقعیت‌های خاصی قرار می‌گیرند تا شعله از نوع غیر پیش‌آمیخته ایجاد شود. میدان جریان مورد بررسی بصورت یک مکعب با اضلاع ۸۰۰ میلی‌متر طراحی شده است. جزئیات ابعاد هندسی در جدول بیان شده است.

جدول (۱-۳) مشخصات جریان ورودی سوخت و هوا در حالت بدون احتراق

سیال ورودی	سوخت	هوا
قطر نازل ورودی (mm)	6.35	9.55
زاویه پاشش $\theta_{12}$ (deg)	20	0
سرعت ورودی (m/s)	9.996	47.1
فاصله دو نازل از یکدیگر - S (mm)	127	

<sup>27</sup>SJWJ: Strong Jet/Weak Jet

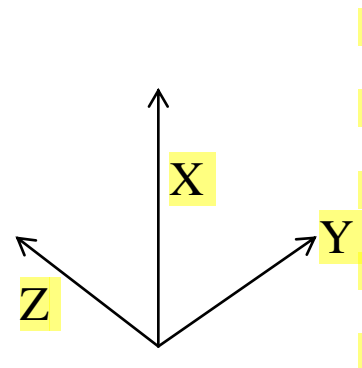
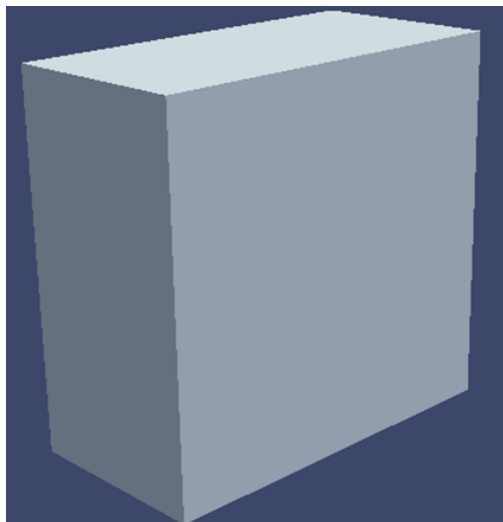


شکل (۱-۳) هندسه‌ی متقارن صفحه‌ای مشعل شبیه‌سازی شده [۱۸]

قابل ذکر است که بدلیل داشتن اطلاعات سرعت در خروجی نازل‌ها، شبیه‌سازی جریان از صفحه‌ی  $X=0$  به بالا انجام می‌شود. همچنین مقادیر سرعت موجود در جدول (۱-۳)، در خروجی نازل‌ها و ابتدای میدان حل بوده که در آزمایش تجربی مرجع [۱۸] اندازه‌گیری و بیان شده است.

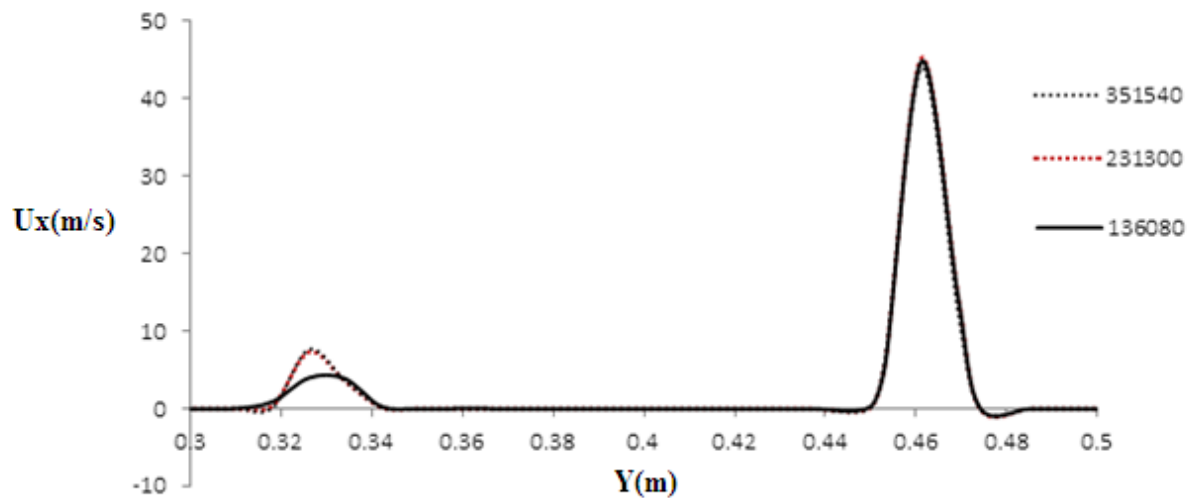
### ۳-۱-۱- کیفیت شبکه‌بندی میدان محاسباتی

از آنجا که مسئله مورد بررسی دارای یک تقارن نسبت به صفحه مرکزی در راستای افقی می‌باشد، برای شبیه‌سازی عددی مسئله فقط نیمی از آن بصورت سه بعدی مدل می‌شود.



شکل (۲-۳) هندسه‌ی شماتیک میدان حل (با فرض تقارن نسبت به صفحه‌ی  $Z=0$ )

برای مطالعه استقلال محاسبات عددی از شبکه‌بندی، نتایج مربوط به توزیع سرعت حاصل از شبیه‌سازی برای سه حالت شبکه‌بندی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۳-۴) پروفیل سرعت در راستای محور عمودی (X) مشعل را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی انجام شده با تعداد ۱۳۶۰۸۰ سلول قادر به پیش‌بینی مناسب سرعت در امتداد نازل سوخت نیست.

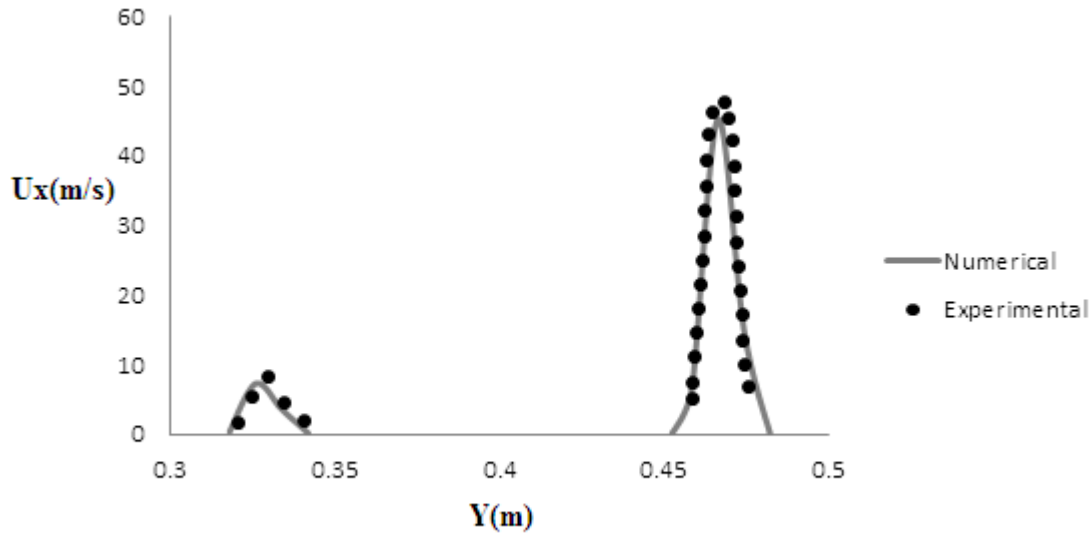


شکل (۳-۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان سرد در شبکه‌های مختلف، تغییرات سرعت در راستای X نسبت به خط افقی Y

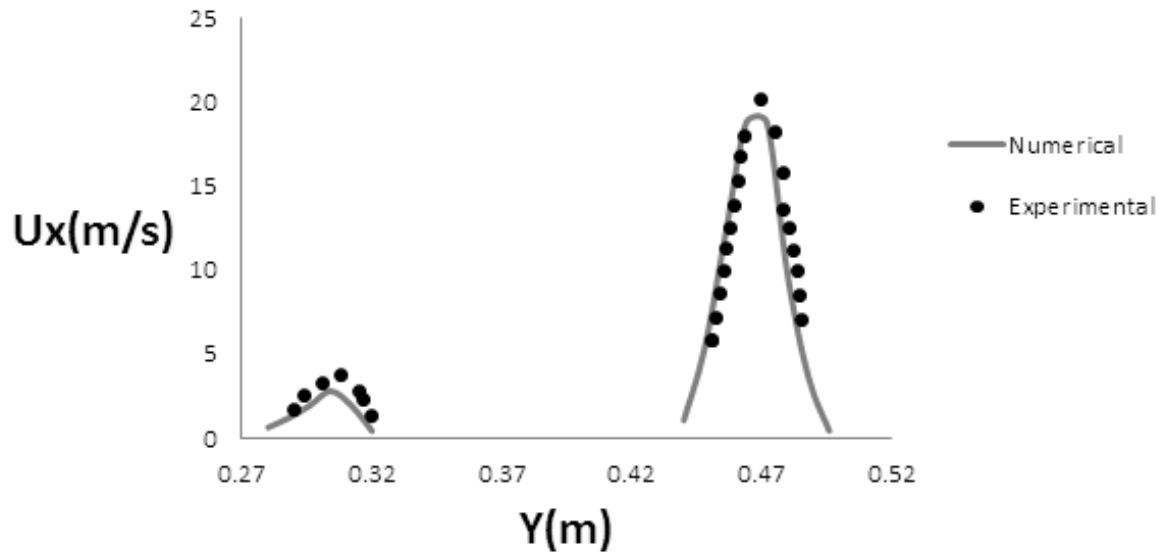
همانطور که در شکل (۳-۳) قابل مشاهده است، نتایج حاصل برای شبکه‌بندی با ۳۵۱۵۴۰ سلول و ۲۳۱۳۰۰ سلول اختلاف ناچیزی دارند، بنابراین جهت بهینه‌سازی زمان محاسبات از ۲۳۱۳۰۰ سلول برای شبیه‌سازی میدان جریان مورد نظر استفاده شده است. بعد از بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی مورد استفاده، به ارزیابی دقت شبیه‌سازی عددی جریان سرداختلاطی در مشعل پرداخته شده است.

### ۳-۱-۲- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی کد حلگر مورد استفاده برای شبیه‌سازی رژیم جریان سرد، مشعل با مشخصات موجود در جدول (۳-۱) برای مقایسه نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج عددی حاصل از محاسبات حاضر با نتایج آزمایشگاهی یمر و همکاران [۱۸] مقایسه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه در خطوط افقی روی صفحه‌ی تقارن و در فواصل متفاوت 19.9mm و 120mm در شکل (۳-۴) و (۴-۵) ترسیم شده است.



شکل (۳-۴) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در فاصله‌ی 19.9mm از سطح مقطع ورودی



شکل (۳-۵) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در فاصله‌ی 120mm از سطح مقطع ورودی

حال میزان خطای شبیه‌سازی عددی در تعداد  $n$  داده، با استفاده از رابطه‌ی (۳-۱) محاسبه می‌شود:

$$Error = \frac{\sum \left( \frac{Experimental - Numerical}{Experimental} \right)}{n} \quad (۳-۱)$$

جدول (۲-۳) میزان خطای سرعت در راستای عمودی ( $U_x$ ) برای محاسبات عددی درمقایسه بانتهای تجربی

X=120mm	X=19.9mm	خط مقطع
21.2%	18.4%	درصد بیشینه خطا
14.3%	8.6%	درصد خطای میانگین

با توجه به مقادیر میانگین خطا در جدول (۲-۳)، می‌توان گفت محاسبات انطباق قابل قبولی با نتایج تجربی دارند. بنابراین با استفاده از معادلات ذکر شده در فصل ۲، می‌توان جریان سرد اختلاط دو جریان سوخت و هوا را شبیه‌سازی کرده و به بررسی پارامترهای هندسی تأثیرگذار بر اختلاط پرداخت.

### ۳-۱-۳- پارامتر اختلاط

از آنجا که معمولاً در هندسه و مشعل‌های متفاوت؛ پارامتر اختلاط با توجه به همان نوع مشعل تعریف می‌شود، در هندسه‌ی فعلی مشعل SJWJ از پارامتری جدید استفاده کرده که بتوان میزان اختلاط سوخت/هوا را در محفظه مشخص نمود.

کسر مخلوط، پارامتری بسیار پرکاربرد در بحث احتراق بخصوص در شعله‌های غیرپیش‌آمیخته است که در مورد احتراق سوخت متان و هوا بصورت رابطه‌ی (۳-۳) تعریف می‌شود [۲۴]:

$$Z = \frac{4Y_F - Y_{O_2} + 0.23}{4Y_{F,1} + 0.23} \quad (۲-۳)$$

که در آن  $Y_F$ ، کسر جرمی متان در هر نقطه و  $Y_{O_2}$ ، کسر جرمی اکسیژن در هر نقطه است. در شرایط استوکیومتری، این رابطه به شکل (۳-۳) تبدیل می‌شود [۲۴]:

$$Z_{st} = \frac{0.23}{4Y_{F,1} + 0.23} = 0.0543 \quad (۳-۳)$$

بنابراین می‌توان اینطور در نظر گرفت که جهت دستیابی به اختلاط بهتر سوخت و هوا و در نتیجه احتراق بهتر، می‌بایست به کسر مخلوط استوکیومتری یا همان  $0.0543$  نزدیک‌تر بود [۳]. میزان انحراف از این مقدار، بصورت رابطه‌ی (۴-۳) تعریف می‌شود که در هر نقطه از محفظه قابل محاسبه است. از آنجایی که غالباً شرایط استوکیومتری، شرایطی ایده‌آل است و می‌تواند باعث ایجاد احتراقی با کیفیت‌تر و کم‌آلاینده‌تر شود، بنابراین می‌توان گفت که هرچه این مقدار کم‌تر باشد، شرایط حاضر به حالت استوکیومتری نزدیک‌تر بوده و انتظار می‌رود احتراق بهتری صورت گرفته و آلاینده‌ی کمتری نیز تولید شود. این پارامتر را می‌توان مشابه تابع واریانس در نظر گرفت که مربع تفاضلات از معیار حالت خاصی را محاسبه می‌نماید.

$$X = (Z - Z_{st})^2 \quad (۴-۳)$$



### ۳-۱-۴- بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر اختلاط جریان سوخت و هوا

همانطور که در فصل ۱ نیز اشاره شد، نوع و میزان اختلاط سوخت و هوا می‌تواند بر عملکرد احتراق مشعل تأثیرگذار باشد. جهت بررسی و مطالعه در این تحقیق، برخی پارامترهای هندسی تغییر داده شده و میزان اختلاط سوخت و هوا در هر یک از آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

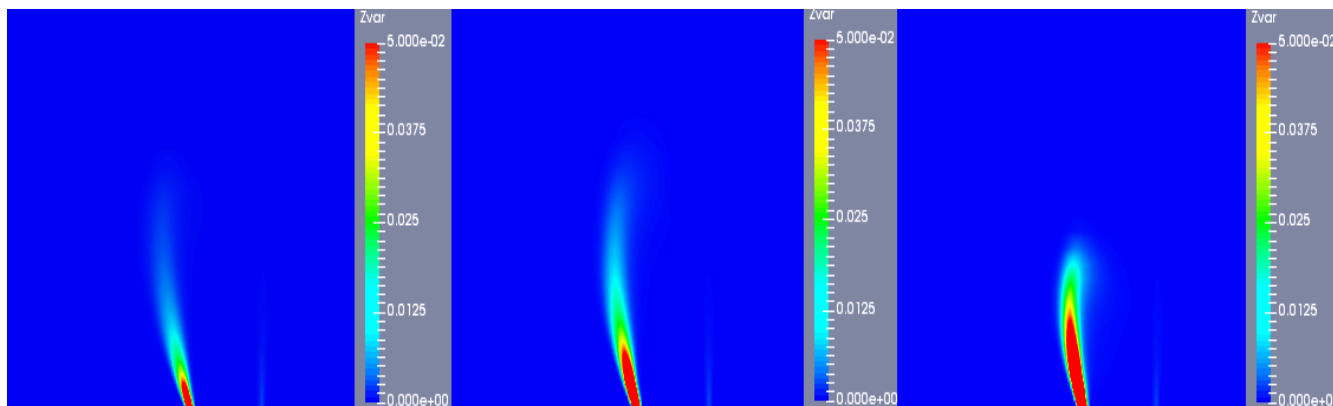
#### ۳-۱-۴-۱ تأثیر قطر نازل ورودی سوخت

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر میزان اختلاط و کیفیت احتراق صورت گرفته، قطر نازل ورودی سوخت است [۶]. لذا با افزایش و کاهش قطر اولیه نازل سوخت، به بررسی تأثیر این پارامتر بر میزان اختلاط می‌پردازیم. از آنجا که مقایسه نتایج می‌بایست در شرایط عملکردی و توان یکسان باشد، بنابر این با فرض دبی جرمی سوخت ثابت؛ با کاهش قطر، سرعت را افزایش و با افزایش قطر، سرعت را کاهش می‌دهیم تا دبی جرمی سوخت ثابت بماند. در این حالت، قطر نازل ورودی هوا بدون تغییر و ثابت می‌باشد.

جدول (۳-۳) مشخصات قطر و سرعت‌های ورودی سوخت در بررسی اول

سرعت (m/s)	قطر نازل ورودی سوخت (mm)
20.082	4.48
9.996	6.35
4.447	9.52

شکل (۳-۶) بیانگر تغییرات پارامتر X در صفحه‌ی تقارن مشعل در سه قطر متفاوت است:



شکل (۳-۶) کانتور تغییرات پارامتر X در قطر نازل سوخت برای قطرهای متفاوت-از راست به چپ 4.48mm و 6.35mm، 9.52mm

همانطور که از شکل (۳-۶) مشخص است؛ پارامتر X با افزایش قطر نازل سوخت، افزایش می‌یابد. همچنین با میانگین‌گیری از مجموع این پارامتر در صفحه‌ی مرکزی محفظه، نتایج زیر بدست آمد:

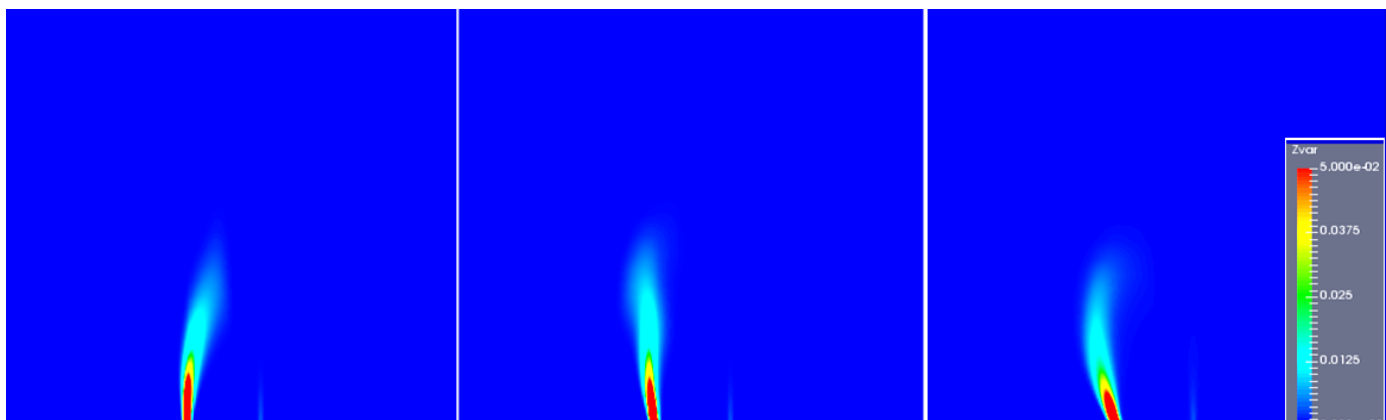
جدول (۳-۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی قطرهای متفاوت ورودی سوخت

میانگین X	قطر نازل ورودی سوخت (mm)
0.00317	4.48
0.007935	6.35
0.010888	9.52

از جدول (۳-۴) نیز مشخص است که کمترین میانگین پارامتر X مربوط به کمترین قطر است، و در مجموع این هندسه به شرایط استوکیومتریکی نزدیک‌تر است. بنابراین می‌توان گفت در این حالت  $D_f=4.48\text{mm}$  مناسب‌تر است. چرا که در قطر کمتر نازل سوخت، نسبت شار مومنتوم سوخت به هوا افزایش پیدا کرده و این امر موجب وجود سرعت‌های منفی سوخت در اطراف جریان هوا، یکنواختی اختلاط بیشتری را ایجاد می‌کند. با کاهش قطر پاشنده سوخت، اختلاط سوخت با هوا و واکنش بین آنها با تأخیر بیشتری انجام می‌شود. دلیل این امر این مطلب است که با کاهش قطر نازل ورودی سوخت، محل تداخل جریان جت هوا و سوخت به پایین دست جریان منتقل می‌شود. باید توجه داشت که همواره با کاهش قطر نازل سوخت، نمی‌توان انتظار اختلاط نزدیک‌تر به شرایط استوکیومتریکی را داشت. مرجع [۱۷] نسبت شار مومنتوم سوخت به هوا را برای شرایط کاری این نوع از مشعل‌ها در شرایط کارکرد استوکیومتریکی، حدود 0.02 معرفی کرده که بر این حساب، کمترین قطر نازل سوخت در این کار می‌تواند حدود 4mm در نظر گرفته شود.

### ۳-۴-۱-۲ تأثیر زاویه پاشش سوخت

در این بخش، از سه زاویه مختلف جهت پاشش سوخت با قطر ورودی یکسان به درون محفظه استفاده شده که نتایج آن به شرح زیر است:



شکل (۳-۷) کانتور تغییرات پارامتر X با زوایای مختلف پاشش سوخت - از راست به چپ؛ 0، 10، 20 و 0 درجه

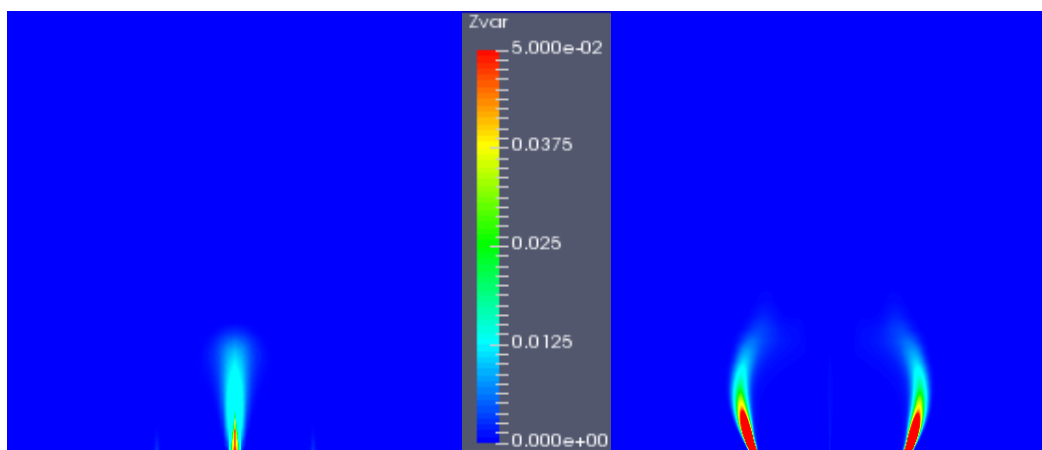
جدول (۳-۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی زوایای مختلف پاشش سوخت

میانگین X	زاویه پاشش سوخت نسبت به محور عمودی (درجه)
0.010893	0
0.00918	10
0.007935	20

از جدول (۳-۵) نیز مشخص است که کمترین میانگین پارامتر X مربوط به زاویه پاشش ۲۰ درجه است، و در مجموع این هندسه به شرایط استوکئومتریکی نزدیک‌تر است. بنابر این می‌توان گفت در این ۳ حالت موجود، زاویه پاشش ۲۰ درجه مناسب‌تر است. البته باید توجه شود که زاویه پاشش سوخت در مقادیر بیشتر از یک حد مشخص نقشی نامطلوب در فرآیند اختلاط خواهد داشت. مرجع [۸] این زاویه بحرانی را بین ۲۰ تا ۲۴ درجه پیش‌بینی کرده است. در زوایای بیشتر از این زاویه بحرانی، جریان جت سوخت قبل از تداخل با جریان هوا به دیواره کوره برخورد می‌کند و اختلاط بین سوخت و هوا به طور مناسب صورت نمی‌پذیرد.

### ۳-۴-۱-۳ تأثیر افزایش تعداد نازل‌های ورودی سوخت و هوا

در این قسمت، یک‌بار به جای یک نازل سوخت، از دو نازل سوخت بصورت متقارن در دو سمت نازل هوا با قطر ثابت، زاویه پاشش یکسان و مجموع دبی ورودی سوخت ثابت، استفاده می‌شود. بار دیگر به جای یک نازل هوا، از دو نازل هوا بصورت متقارن در دو سمت نازل سوخت با قطر ثابت، زاویه پاشش یکسان و مجموع دبی ورودی هوای ثابت، استفاده می‌شود. باید توجه داشت که در هر دو حالت، مجموع دبی هوا و دبی سوخت ورودی ثابت است و توان ورودی تغییری نمی‌کند.



شکل (۳-۸) کانتور تغییرات پارامتر X با دو نازل سوخت و دو نازل هوا

جدول (۳-۶) نتایج حاصل از شبیه‌سازی تعداد متفاوت نازل سوخت و هوا

تعداد نازل سوخت	تعداد نازل هوا	میانگین X
۱	۱	0.007935
۲	۱	0.021023
۱	۲	0.001334

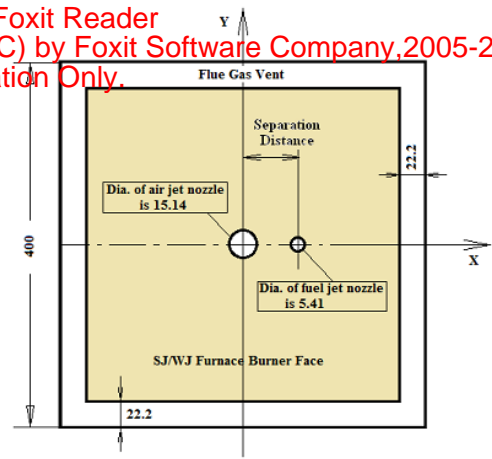
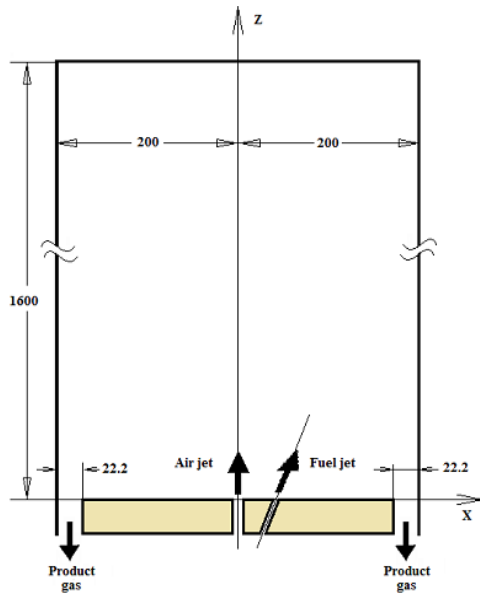
نتایج نشان می‌دهد که میانگین پارامتر X با افزایش تعداد نازل‌های سوخت، افزایش می‌یابد؛ این عدد تقریباً سه برابر حالت یک نازل است. بنابر این این کار اختلاط ما را از شرایط استوکیومتریکی دور کرده و انجام آن توصیه نمی‌شود. اما مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد نازل‌های هوا، اختلاط به شرایط استوکیومتریکی نزدیک‌تر بوده و میانگین X به مقدار نسبتاً زیادی کاهش یافته‌است. بنابر این به نظر می‌رسد با دبی هوای ورودی ثابت؛ بهتر است به جای استفاده از یک نازل از دو نازل هوا استفاده شود.

### ۳-۲- مشخصات مشعل شبیه‌سازی شده با جریان احتراقی

جهت مطالعه رژیم جریان احتراقی از مشعل نوع جت قوی/جت ضعیف ارائه‌شده توسط یو [۲۱] در سال ۲۰۰۸ استفاده شده‌است. شرایط اولیه در جدول (۳-۷) و میدان جریان مورد بررسی در شکل (۳-۸) قابل مشاهده است.

جدول (۳-۷) مشخصات جریان ورودی سوخت و هوا در مشعل با احتراق

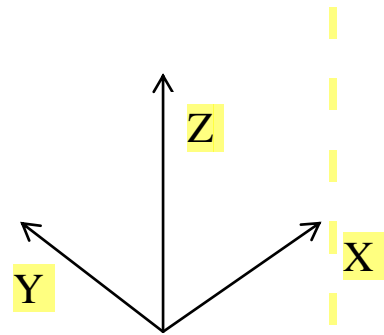
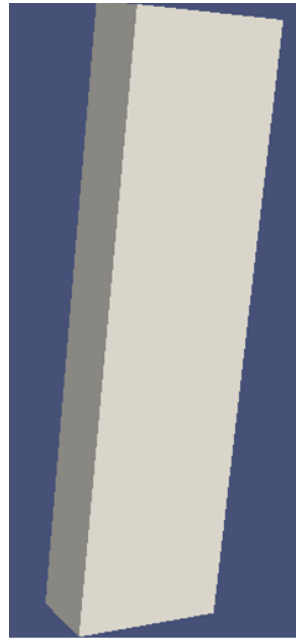
سیال ورودی	سوخت	هوا
قطر نازل ورودی (mm)	5.41	15.14
زاویه پاشش $\theta_{12}$ (deg)	10	0
دبی حجمی ( $m^3/s$ )	0.00127	0.0127
سرعت ورودی (m/s)	55.43	70.78
دمای ورودی ( $^{\circ}C$ )	15	51
فاصله دو نازل از یکدیگر - S (mm)	50	



شکل (۹-۳) نمای فوقانی و جانبی کوره

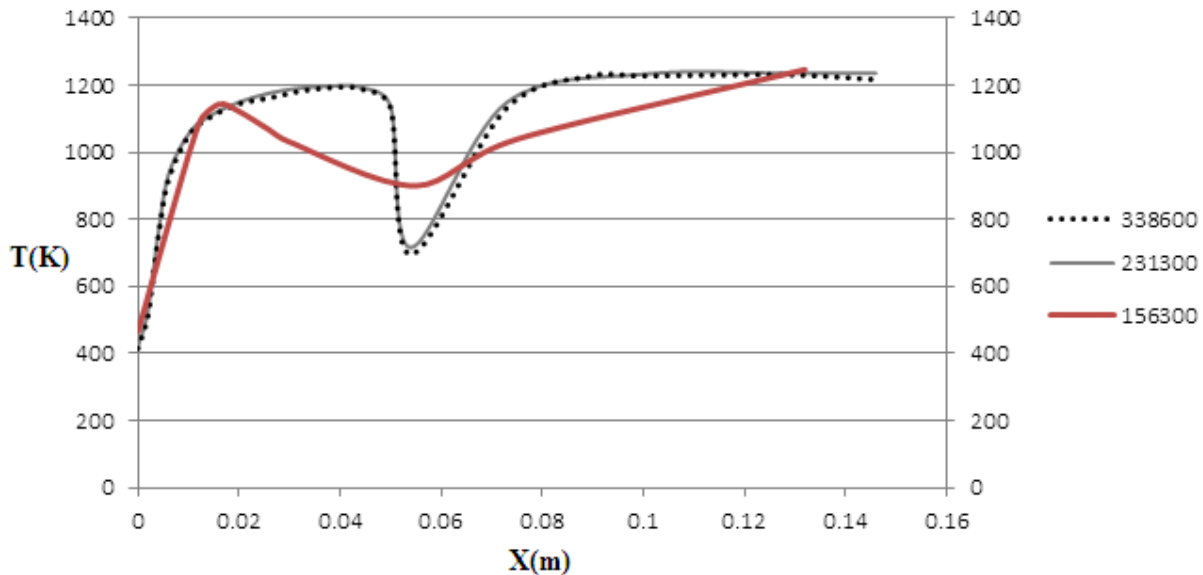
### ۳-۲-۲- کیفیت شبکه بندی میدان محاسباتی

از آنجا که هندسه ی این مسئله نیز دارای یک تقارن نسبت به صفحه مرکزی در راستای افقی می باشد، برای شبیه سازی عددی مسئله فقط نیمی از آن بصورت سه بعدی مدل می شود.



شکل (۱۰-۳) شماتیک میدان حل

برای مطالعه استقلال محاسبات عددی از شبکه‌بندی، نتایج مربوط به توزیع دما حاصل از شبیه‌سازی برای سه حالت شبکه‌بندی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۳-۱۱) پروفیل دما در راستای محور عمودی (Z) مشعل در مقطع 60mm را نشان می‌دهد.

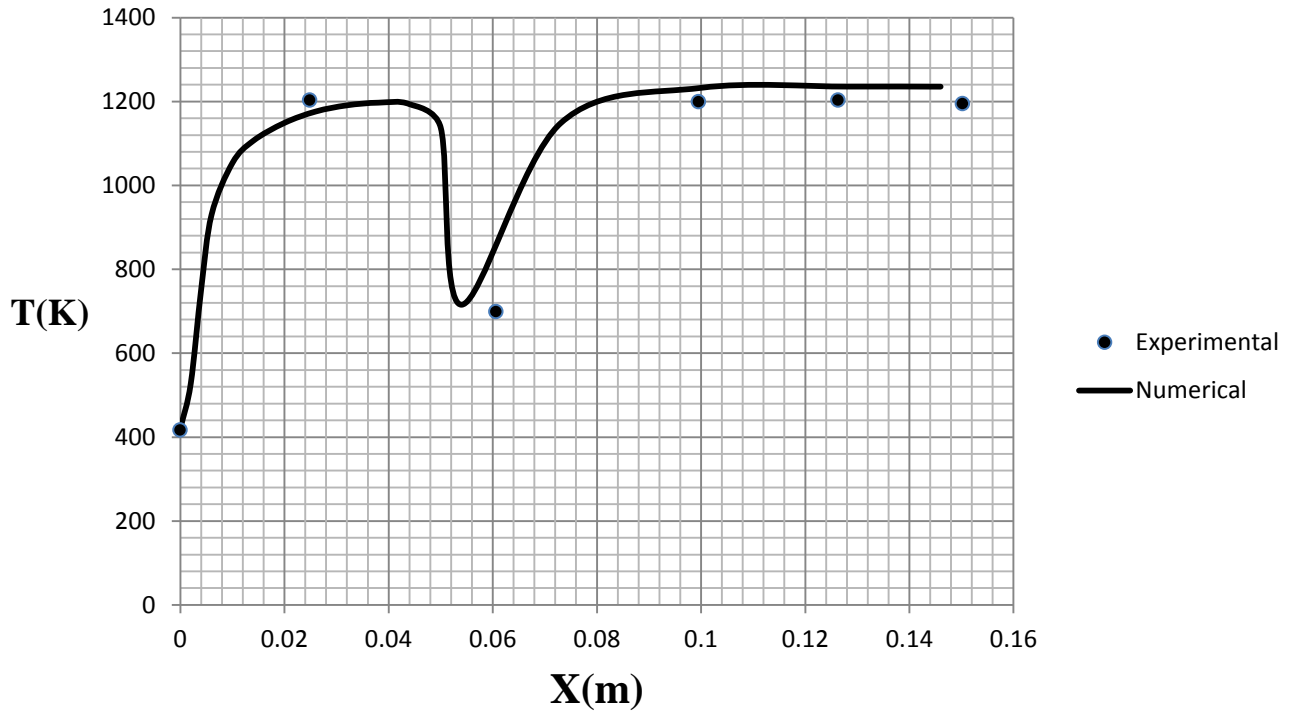


شکل (۳-۱۱) نتایج حاصل از شبیه‌سازی احتراق در شبکه‌بندی متفاوت، تغییرات دما در راستای X در مقطع  $X=60\text{mm}$  و  $Y=0$

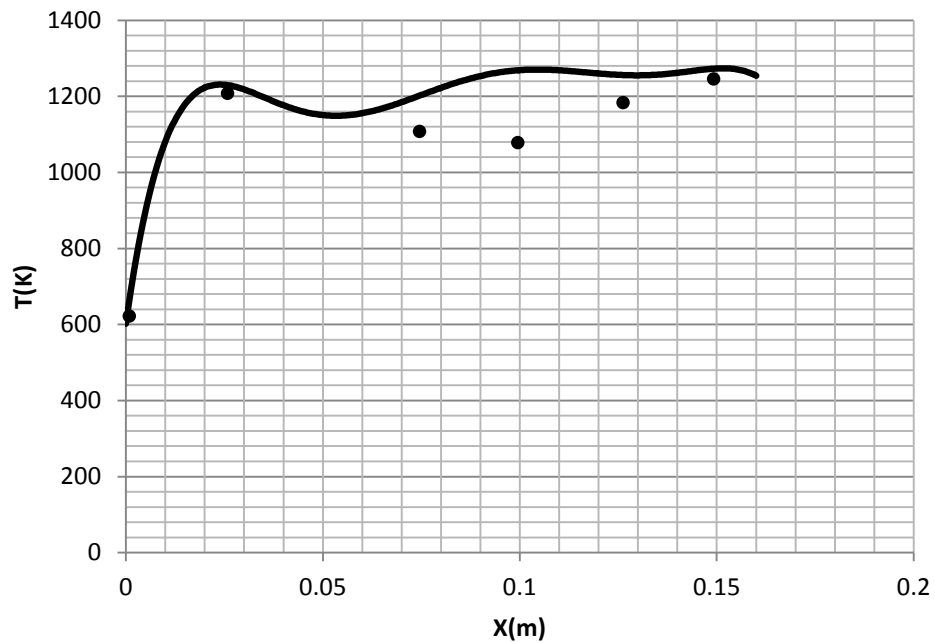
همانطور که در شکل (۳-۱۱) قابل مشاهده است، نتایج حاصل برای شبکه‌بندی ۱۵۶۳۰۰ دارای اختلاف زیادی با دو شبکه‌بندی دیگر است که به نظر می‌رسد به علت اندازه بزرگ‌تر سلول‌های محاسباتی است. اما در مورد شبکه‌بندی با ۲۳۱۳۰۰ سلول و ۳۳۸۶۰۰ سلول اختلاف ناچیز است، بنابراین جهت بهینه‌سازی زمان محاسبات از ۲۳۱۳۰۰ سلول برای شبیه‌سازی مسئله مورد نظر و استفاده از نتایج استفاده شده است. بعد از بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی مورد استفاده، به ارزیابی دقت شبیه‌سازی عددی جریان احتراقی و صحت سنجی مدل‌های مورد استفاده در مشعل پرداخته شده است.

### ۳-۲-۳- صحت سنجی مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی احتراقی

به منظور صحت سنجی کد حلگر مورد استفاده برای شبیه‌سازی رژیم جریان احتراقی، مشعل با مشخصات موجود در جدول (۳-۷) برای مقایسه نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج عددی حاصل از محاسبات حاضر برای دمای گازهای درون محفظه با نتایج آزمایشگاهی یو [۲۲] مقایسه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه در خطوط افقی روی صفحه‌ی تقارن و در فواصل متفاوت 60mm متر و 108mm در شکل (۳-۱۲) و (۳-۱۳) ترسیم شده است.



شکل (۳-۱۳) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در راستای X نسبت در مقطع  $Y=0$  و  $Z=60\text{mm}$



شکل (۳-۱۴) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در راستای X نسبت در مقطع  $Y=0$  و  $Z=108\text{mm}$

جدول (۸-۳) میزان خطای سرعت در راستای عمودی ( $U_x$ ) برای محاسبات عددی در مقایسه با نتایج تجربی

Z=108mm	Z=60mm	خط مقطع
20.7%	4.3%	درصد بیشینه خطا
5.2%	3.1%	درصد خطای میانگین

با توجه به مقادیر میانگین خطا در جدول (۸-۳)، می‌توان گفت محاسبات انطباق قابل قبولی با نتایج تجربی دارند. بنابر این می‌توان از صحت روش‌ها و مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی اطمینان حاصل نموده و به نتایج آن اعتماد کرد.

### ۳-۳- شبیه‌سازی جریان احتراقی در مسئله‌ی معیار اولیه

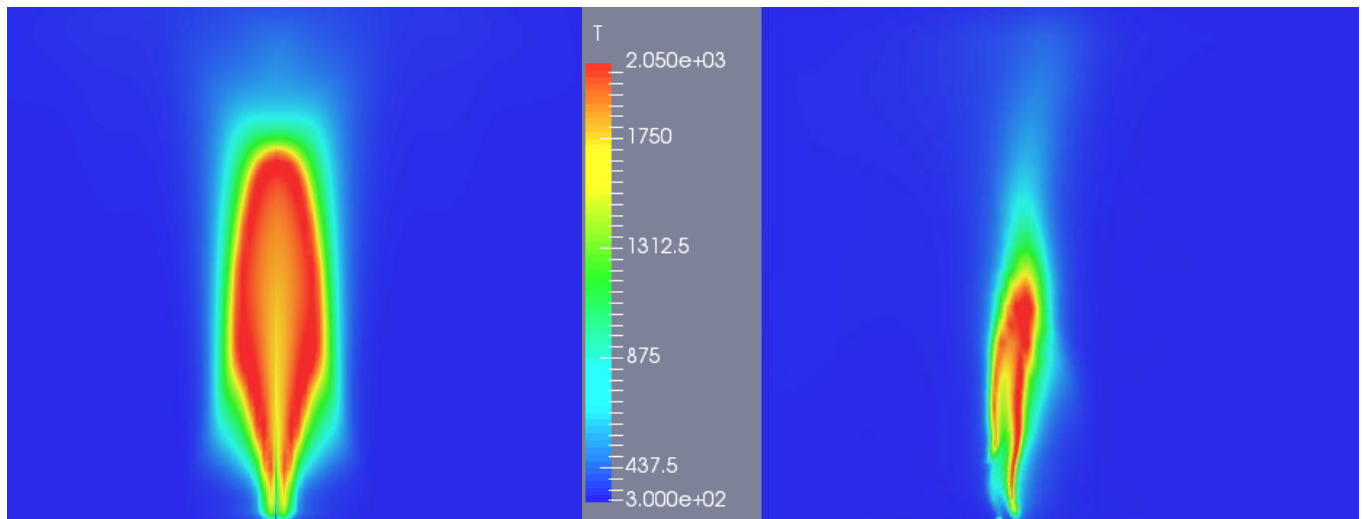
در این بخش با توجه به نتایج حاصل از پارامترهای تأثیرگذار بر اختلاط سوخت و هوا در بخش ۳-۱، به شبیه‌سازی جریان احتراقی در دو نمونه مشعل با مشخصات هندسی مذکور پرداخته می‌شود. از آنجایی که در تحلیل جریان سرد؛ طرح مشعل با دو نازل هوا دارای کمترین پارامتر  $X$  و در واقع اختلاط یکنواخت‌تر و نزدیک‌تر با حالت استوکیومتریک را دارا بود، کیفیت احتراق و میزان آلاینده‌ی CO در خروجی آن با نمونه مشعل معیار اولیه مقایسه می‌شوند:

جدول (۹-۳) مشخصات ۲ نمونه مشعل مورد بررسی از نظر احتراق

نمونه شماره ۲ (اصلاح شده)	نمونه شماره ۱ (معیار اولیه)	
6.35	6.35	قطر نازل سوخت (mm)
9.55	9.55	قطر نازل هوا (mm)
20	20	زاویه پاشش سوخت (Deg)
1	1	تعداد نازل سوخت
2	1	تعداد نازل هوا
0.001334	0.007935	پارامتر $X$

پس از شبیه‌سازی جریان احتراقی در دو هندسه‌ی ذکر شده، نتایج توزیع دما، ساختار شعله و همچنین میزان آلاینده‌ی خروجی CO به شکل زیر است:





شکل (۳-۱۵) کانتور توزیع دما و ساختار شعله در هندسه‌ی معیار و اصلاح شده همانطور که از شکل (۳-۱۵) مشاهده می‌شود، شعله‌ی بهتری در مشعل اصلاح‌شده تشکیل شده است.

جدول (۳-۱۰) میانگین دما در میدان حل (فضای کوره)

نوع هندسه مشعل	دمای میانگین در راستای شعله (K)
هندسه‌ی معیار اولیه	421.87
هندسه اصلاح شده با دو نازل هوا	524.62

همچنین با محاسبه‌ی میانگین دما در میدان حل، مشاهده می‌شود که دمای میانگین با اصلاح الگوی جریان و اختلاط، افزایش یافته است. بنابراین راندمان حرارتی مشعل با میزان سوخت یکسان، افزایش یافته است.

جدول (۳-۱۱) میانگین CO در خروجی مشعل

نوع هندسه مشعل	میزان کسر جرمی CO در خروجی (ppm)
هندسه‌ی معیار اولیه	0.0762
هندسه اصلاح شده با دو نازل هوا	0.109

در نهایت، میزان آلاینده‌ی CO در خروجی محفظه محاسبه شد. چرا که میزان آلاینده‌ای که از مشعل به محیط انتقال می‌یابد، اهمیت دارد. همانطور که در جدول (۳-۱۱) مشاهده می‌شود، میزان CO در خروجی برای هندسه‌ی دوم بیش‌تر از هندسه‌ی اول است. علت این مسئله به میزان هوای کمتر در بخش خروجی هندسه‌ی اصلاح شده مربوط است. چرا که اگر سوخت و یا هوا هر کدام بیش‌تر و یا کم‌تر از نسبت مشخصی باشد، جریان مخلوط را از حالت استوکیومتریک دور می‌کند، اما در احتراق

رفتار متفاوتی خواهد داشت. اینکه سوخت کمتر باشد، دمای احتراق را کاهش می‌دهد. در جایی که هوا کم‌تر باشد، می‌تواند منجر به تولید CO شود. بنابر این اگرچه در هندسه‌ی اصلاح شده دمای بالاتری ایجاد می‌شود، اما به نظر می‌رسد در قسمت‌های منتهی به خروجی محفظه، کسر جرمی سوخت غالب‌تر بوده و این مسئله منجر به تولید CO بیش‌تر شده است.

### ۴-۳- جمع‌بندی

در این فصل، ابتدا به شبیه‌سازی جریان سرد در یک مشعل SJWJ به ابعاد  $80 \times 80 \times 80 \text{ cm}^3$  پرداخته شد. پس از صحت‌سنجی نتایج سرعت با نتایج تجربی موجود در مرجع [۱۷]، کیفیت و میزان اختلاط جریان سوخت و هوا در محفظه‌ی مشعل برای حالات مختلف پاشش سوخت، ابعاد نازل و همچنین تعداد نازل‌های هوا و سوخت با مجموع دبی جریان ورودی ثابت مورد ارزیابی قرار گرفت. این موضوع با استفاده از پارامتر X که نشان‌دهنده‌ی میزان انحراف از مقدار کسر مخلوط استوکیومتری است، نشان داده شد. نتایج کار بیانگر این مسئله بود که کمترین مقدار پارامتر X و در واقع نزدیک‌ترین اختلاط به حالت استوکیومتریک، مشعل با دو نازل هوا است.

سپس با استفاده از نتایج تجربی دما در جریان احتراقی مسئله‌ی مرجع [۲۱]، نتایج حاصل از شبیه‌سازی احتراق صحت‌سنجی شد. با توجه به میزان خطای میانگین کل حدود 4.2% می‌توان به مدل‌های احتراقی مورد استفاده اعتماد کرد.

در نهایت با استفاده از نتایج بدست‌آمده در شبیه‌سازی جریان سرد، به شبیه‌سازی جریان احتراق در دو نمونه مشعل مرجع و مشعل با دو نازل هوا پرداخته شد. نتایج این کار نشان‌دهنده‌ی آن بود که در هندسه‌ی با دو نازل هوا که اختلاط نزدیک‌تری به حالت استوکیومتریک دارد، دمای بیشینه و میانگین آن بالاتر است. افزایش میزان آلاینده‌ی خروجی CO با بهبود اختلاط بدین معنا نیست که اختلاط یکنواخت‌تر، آلاینده‌ی بیشتری را خارج می‌کند. در واقع همانطور که مشاهده می‌شود، راندمان حرارتی مشعل افزایش پیدا کرده است. میزان هوا در اختلاط بهتر، متناسب با میزان سوخت است. اما در اختلاط هندسه‌ی اول میزان هوا در ناحیه اختلاط و احتراق، بیش‌تر از سوخت بوده و این مسئله منجر به کسر مخلوط دورتر از حد استوکیومتریک می‌شود و همچنین به سبب کمبود سوخت نسبت به هوا، میزان تولید CO کم‌تر است. در نهایت با مقایسه‌ی میانگین دمای ایجاد شده در محفظه و میزان آلاینده‌ی CO در خروجی، می‌بایست شرایط بهینه‌ای اعمال کرد که هم بتوان احتراقی با کیفیت و راندمان بالاتر داشت، هم آلاینده‌ی خروجی کم‌تر باشد.



## فصل ۴ جمع‌بندی و پیشنهادات

### ۴-۱- خلاصه و جمع‌بندی تحقیق انجام گرفته

امروزه فرآیند احتراق در صنایع و کاربردهای مختلف انسانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به افزایش روزافزون میزان آلاینده‌های زیست محیطی، کیفیت احتراق و میزان آلاینده‌های خروجی از آن اهمیت بسیاری دارد. یکی از عواملی که می‌تواند در کیفیت احتراق مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته مؤثر باشد، کیفیت و چگونگی اختلاط سوخت و هواست. چرا که جهت دستیابی به شعله‌ای با راندمان خوب، می‌بایست نسبت اختلاط هوا به سوخت را حد مناسبی نگه داشت. از لحاظ تئوریک، بهترین مخلوط متشکل از مقدار کافی هوا و در واقع مقدار کافی اکسیژن است تا بتواند سوخت گاز را بطور کامل بسوزاند. این مخلوط مناسب را مخلوط استوکیومتریک می‌نامند. بنابر این جهت افزایش راندمان احتراق و در واقع بهره‌وری بیشتر از انرژی سوخت، می‌بایست به اختلاطی مناسب‌تر و نزدیک‌تر به شرایط استوکیومتریک دست یافت.

در تحقیق حاضر، در ابتدا به مدلسازی جریان سوخت و هوا و چگونگی اختلاط این دو سیال با یکدیگر پرداخته شده است. با ایجاد تغییراتی در هندسه و جریان مسئله‌ی معیار اولیه، حالت‌های متفاوتی از اختلاط و توزیع سوخت و هوا در محفظه بدست آمد. پارامترهایی از قبیل قطر نازل سوخت، زاویه پاشش سوخت و تعداد نازل‌های سوخت و هوا بعنوان عواملی تأثیرگذار در نحوه‌ی اختلاط جریان‌ها مورد نظر قرار گرفته است. در شرایطی که مقدار کسر مخلوط جریان در میدان حل به شرایط استوکیومتریک نزدیک‌تر بود، می‌توان گفت اختلاط بهتر و با کیفیت‌تری صورت گرفته است. در نهایت پس از صحت‌سنجی مدل‌های احتراقی مورد استفاده، به شبیه‌سازی جریان احتراق در دو نمونه مشعل با اختلاط‌های متفاوت پرداخته شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی این امر بود که اختلاط یکنواخت‌تر و نزدیک‌تر به شرایط استوکیومتریک، به دمای بالاتر منجر شده و راندمان حرارتی مشعل را بهبود می‌بخشد. اما میزان آلاینده‌ی CO در خروجی افزایش یافت که به سبب بیش‌تر بودن سوخت موضعی در هندسه‌ی اصلاح‌شده، این مسئله قابل توجه است. بنابر این لزوماً با میانگین اختلاط نزدیک‌تر به شرایط استوکیومتریک، نمی‌توان انتظار کاهش آلاینده‌ی CO را داشت. می‌بایست نسبت سوخت و هوا در تمام محفظه یکنواخت‌تر و در محدوده‌ی مشخصی قرار گیرد.

### ۴-۲- پیشنهادات جهت ادامه‌ی کار

۱. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، نوع هندسه‌ی ورودی نازل‌های سوخت و هوا می‌تواند بر الگوی جریان تأثیرگذار باشد. هندسه‌های متفاوتی از قبیل: مربع و یا هشت ضلعی به جای دایره می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

۲. نحوه‌ی پاشش سوخت و هوا به صورت مقابل از دو سمت مشعل مورد بررسی قرار گیرد. این الگوی جریان می‌تواند اختلاط متفاوتی داشته باشد.
۳. بدلیل کمبود وقت، میزان آلاینده‌ی  $\text{NO}_x$  در کار حاضر بررسی نشد. جهت مشاهده‌ی بهتر تأثیر اختلاط سوخت و هوا بر میزان آلاینده‌ی خروجی، پیشنهاد می‌شود به بررسی آلاینده‌ی  $\text{NO}_x$  نیز پرداخته شود.
۴. به جز دو حالت احتراقی شبیه‌سازی شده، مابقی شرایط جریان‌های اختلاط نیز از نظر احتراقی بررسی شده و با یکدیگر مقایسه شوند. اینکه نزدیک شدن به حالت اختلاط مناسب، از نظر کمی چه میزان بر کیفیت احتراق (از جمله دمای شعله و میزان آلاینده‌ی خروجی) تأثیرگذار است.
۵. پارامتری جهت تبیین میزان اختلاط و یکنواختی آن در جریان سوخت و هوا برای شرایط متفاوت هندسی و عملکردی بدست آورده شود؛ چرا که در حال حاضر در هر پژوهش با توجه به همان هندسه‌ی مورد بررسی، میزان اختلاط بررسی می‌شود.

- [1] Brasoveanu, Dan. "Analysis of Gaseous Fuel-Air Mixing and Flame Stability." A thesis submitted to the Department of Mechanical and Materials Engineering in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Prince George's County, Baltimore, Maryland, USA, College Park at University of Maryland, 1997.
- [2] Boutazakhti, Mohamed, M J THOMSON, and M Lightstone. "The Effect of Jet Mixing on the Combustion Efficiency of a Hot Fuel-Rich Cross-Flow." *Combustion science and technology* 163, no. 1 (2001): 211-28.
- [3] Turns, Stephen R. *An Introduction to Combustion*: McGraw-Hill New York, 1996.
- [4] Bilger, RW, and RE Beck. "Further Experiments on Turbulent Jet Diffusion Flames." Paper presented at the Symposium (International) on Combustion, 1975.
- [5] G.Becker, HA, and BD Booth. "Mixing in the Interaction Zone of Two Free Jets." *AIChE Journal* 21, no. 5 (1975): 949-58.
- [6] Wünnig, JA; Wünnig, JG. "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation." *Progress in energy and combustion science* 23, no.1 (1997).
- [7] Katsuki, Masashi, and Toshiaki Hasegawa. "The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air." Paper presented at the Symposium (International) on combustion, 1998.
- [8] Grandmaison, Edward W, Ibrahim Yimer, Henry A Becker, and Andrzej Sobiesiak. "The Strong-Jet/Weak-Jet Problem and Aerodynamic Modeling of the Cgri Burner." *Combustion and flame* 114, no. 3 (1998): 381-96.
- [9] El-Mahallawy, F., Abdelhafez, Ahmed, Mansour, Mohy S. "Mixing and nozzle geometry effects on flame structure and stability." *Combustion science and technology* 179(2007): 249-263.
- [10] Zadghaffari, R, JS Moghaddas, and Z Rahimiahar. "Numerical Investigation of a Burner Configuration to Minimize Pollutant Emissions." *APCBEE Procedia* 3 (2012): 177-81.
- [11] Franzelli, Benedetta, Eleonore Riber, Laurent YM Gicquel, and Thierry Poinot. "Large Eddy Simulation of Combustion Instabilities in a Lean Partially Premixed Swirled Flame." *Combustion and flame* 159, no. 2 (2012): 621-37.
- [12] Cho, Cheon Hyeon, Gwang Min Baek, Chae Hoon Sohn, Ju Hyeong Cho, and Han Seok Kim. "A Numerical Approach to Reduction of No X Emission from Swirl Premix Burner in a Gas Turbine Combustor." *Applied Thermal Engineering* 59, no. 1 (2013): 454-63.
- [13] Zhang, Tian-Hu, Feng-Guo Liu, and Xue-Yi You. "Optimization of Gas Mixing System of Premixed Burner Based on Cfd Analysis." *Energy Conversion and Management* 85 (2014): 131-39.
- [14] Zhao, Dong-Fang, Feng-Guo Liu, Xue-Yi You, Rui Zhang, Bin-Long Zhang, and Gui-Long He. "Optimization of a Premixed Cylindrical Burner for Low Pollutant Emission." *Energy Conversion and Management* 99 (2015): 151-60.
- [15] Mansour, Mohy S, Ayman M Elbaz, William L Roberts, Mohamed S Senosy, Mohamed F Zayed, Mrinal Juddoo, and Assaad R Masri. "Effect of the Mixing Fields on the Stability and Structure of Turbulent Partially Premixed Flames in a Concentric Flow Conical Nozzle Burner." *Combustion and Flame* 175 (2017): 180-200.
- [16] Poinot, T. and Veynante, D. *Theoretical and numerical combustion*. RT Edwards, Inc, 2005.

- [17] Yimer, Ibrahim, Henry A Becker, and EW Grandmaison. "The Strong-Jet/Weak-Jet Problem: New Experiments and Cfd." *Combustion and flame* 124, no. 3 (2001): 481-502.
- [18] Saniei Nejad, M. *Fundamental of Turbulent Flows and Turbulence Modelling*: Danesh Negar, 2009. (In Persian)
- [19] Khalil, E. E., "Assessment of Numerical Computation of Flow Properties in an Axisymmetric Reversed Flow Furnace", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 3[1979]: 25-31.
- [20] Coupie, S, E. "Turbulent Combustion Modeling." Report Internal of the Gas Dynamics Lab, 2011, pp. 6-18(In Persian)
- [21] He, Yu. "Flameless Combustion of Natural Gas in the Sj/Wj Furnace." A thesis submitted to the Department of Mechanical and Materials Engineering in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Kingston, Ontario, Canada, Queen's University, 2008.
- [22] H. Kadar, *Modelling Turbulent Non-Premixed Combustion in Industrial Furnaces*, Thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2015.
- [23] Versteeg, H.K, Malalasekera, W, "An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method", Longman Scientific & Technical, 1995.
- [24] Peters, Norbert. "Combustion Theory." CEFRC SummerSchool (2000).

## **Abstract**

Nowadays, combustion process is being used in different industries and human applications. Combustion quality and exiting pollutants level have been so important these days because of ever-increasing of environmental pollutants. One of the factors that affect the combustion quality of non-premixed burner is the way that fuel and air is being mixed. In order to achieve a flame with higher efficiency, the ratio between fuel and air must be kept in appropriate limit. Theoretically, the best mixture is the one that consist of efficient air that could burn fuel perfectly. This type of mixture is called stoichiometric mixture. Therefore, in order to increase combustion efficiency and take more energy from fuel, the fuel/air mixture must be close to stoichiometric conditions. In this research, first we simulated the fuel/air flow patterns and observed the way that they are being mixed together in a Strong Jet/Weak Jet burner. Different states of mixing and distribution of fuel/air in chamber has been reached by some changes in geometry and flow pattern of the initial case. Parameters such as fuel nozzle diameter, fuel injection angle and the number of fuel/air nozzles are being assumed to have effects on the ways of flows mixing. It could be said that whenever the mixture fraction was close to stoichiometric conditions, combustion with higher quality is achieved. On the Other hand, uniformity of mixture fraction in mixing field is more desirable. Finally, after the validation of combustion models, combustion flows is being simulated in two sample burner with different level of mixing. The results showed that the more uniform mixing was, the more uniform temperature has been reached. But, the level of CO emission has been increased. This was because of more local fuel in improved geometry. Increasing level of CO does not necessarily result in low quality combustion. Because of higher air/fuel ratio in the initial case, the combustion with low temperature has been formed and some parts of fuel go out from the outlet without any chemical reaction.

### **Keywords:**

Combustion quality, air/fuel mixing, Strong Jet/Weak Jet, Injection Angle, Nozzle Diameter