

بسمه تعالی  
پروژه پژوهشی:

## **بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد**

**شماره قرارداد: ENG 275571**

**مجری طرح:**

**سید محمد جوادی، دکتری مکانیک – تبدیل انرژی**

**اردیبهشت ۹۲**

## چکیده

میزان فلرینگ گاز طبیعی در دنیا سالانه بیش از ۱۵۰ میلیارد متر مکعب می باشد که همین موضوع اهمیت بالای مطالعه و بهینه سازی فلر را مشخص می سازد. تا کنون طرح های گوناگونی در راستای بهبود عملکرد فلرها ارائه شده است که از آن جمله می توان به تزریق بخار یا هوا به منطقه احتراق اشاره نمود که باعث افزایش راندمان احتراق و کاهش میزان دوده می گردد. همچنین اثرات محیطی بخصوص سرعت وزش باد اثر قابل توجهی بر تغییر راندمان فلر، انتشار آلاینده ها و تنش های ایجاد شده بر جدار فلر دارد. در این پروژه با استفاده از شبیه سازی رایانه ای احتراق گازهای خروجی از فلر، توزیع میدان دما بر روی جدار فلر محاسبه و با استفاده از آن محل و مقدار بیشینه تنش و کرنش های حرارتی دیوار فلر نیز معین گردید. نتایج نشان می دهد با افزایش سرعت باد، شعله حاصل از احتراق گازها به سمت جدار فلر متمایل شده و سبب گرم شدن این قسمت می گردد. تغییرات دمای مداوم در این ناحیه موجب گسیختگی این قسمت شده است. نتایج شبیه سازی با دقت خوبی محل این گسیختگی را نشان داده است. همچنین در این پژوهش تأثیر عوامل مختلف به منظور کاهش آلاینده های مونواکسید کربن، دوده و ناکس مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از نیروی شناوری موجب کاهش نشر آلاینده دوده می گردد. تأثیر نصب محافظ باد نیز به عنوان یک راهکار عملی به منظور کاهش دمای جدار فلر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سطح مقطع های مختلفی برای خروج گازهای فلر به منظور کاهش دمای جدار فلر در نظر گرفته شد و تأثیر هر کدام مورد ارزیابی قرار گرفت.

فهرست مطالب:

**چکیده** ..... الف

**فصل اول: مقدمه** ..... ۱

۱-۱ تاریخچه گاز در ایران ۲

۲-۱ فعالیتهای اکتشافی در منطقه گازی خانگیران: ۴

۳-۱ شرکت پالایش گاز شهید هاشمی نژاد (خانگیران): ۵

۴-۱ فرآیند تصفیه گاز در پالایشگاه خانگیران ۷

۵-۱ واحد بازیافت گوگرد (SULFUR RECOVERY) ۸

۶-۱ گردش جریان گاز اسیدی در واحد بازیافت گوگرد: ۹

۷-۱ سیستم فلرینگ در پالایشگاه ۱۱

۸-۱ مروری بر کارهای انجام شده ۱۵

**فصل دوم: آشنایی با فلر و انواع آن** ..... ۱۹

۱-۲ مقدمه ۲۰...

۲-۲ ساختار فلر ۲۱

۳-۲ نحوه عملکرد فلر ۳۱

۴-۲ انواع فلر ۳۲

**فصل سوم: معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلوئنت** ..... ۵۵

۱-۳ مقدمه ۵۶...

**فصل چهارم: حل عددی و معادلات حاکم** ..... ۷۰

۷۱	۱-۴ مقدمه
۷۱	۲-۴ معادلات حاکم
۸۰	فصل پنجم: معادلات و تئوری های احتراق .....
۸۱...	۱-۵ مقدمه
۸۱	۲-۵ احتراق آشفته (Turbulent Combustion)
۸۲	۳-۵ اختلاط در جریانهای احتراقی
۸۴	۴-۵ مدل های محاسبه نرخ واکنش در جریانهای آشفته احتراقی
۹۰	فصل ششم: معادلات و تئوری آلاینده ها .....
۹۱...	۱-۶ مقدمه
۹۱	۲-۶ طبقه بندی آلاینده های هوا
۹۲	۳-۶ منابع آلودگی هوا
۹۳	۴-۶ اثرات آلودگی هوا
۹۴	۵-۶ آلاینده دوده
۱۱۸	فصل هفتم: اعتبار سازی حل عددی فلر با نتایج آزمایشگاهی موجود .....
۱۱۹.	۱-۷ مقدمه
۱۱۹	۲-۷ تشریح مراحل حل
۱۲۴	۳-۷ نتایج شبیه سازی فلر آزمایشگاهی دانشگاه آلبرتا
۱۲۹	۴-۷ بررسی دقت حل
۱۳۱	۵-۷ مقایسه مدل های آشفته گی

۱۳۵	۶-۷ راندمان احتراق
۱۳۶	۷-۷ تأثیر سرعت گاز خروجی از فلر بر راندمان
۱۳۶	۸-۷ تأثیر پدیده خوابیدن شعله بر دمای دیواره فلر
۱۳۷	۹-۷ آلاینده‌ها
۱۴۴.....	فصل هشتم: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران.....
۱۴۵.	۱-۸ مقدمه
۱۴۵	۲-۸ محیط حل
۱۵۰	۳-۸ شبیه سازی شعله فلر با سه ترکیب مختلف از گازهای خروجی
۱۵۷	۴-۸ انتشار آلاینده ها و گازهای گلخانه ای از مشعل فلر
۱۶۳.....	فصل نهم: مطالعه آزمایشگاهی و عددی فرآیند پخت در زباله سوز.....
۱۶۴	بخش ۱ - اندازه گیری اثر میزان هوای ورودی بر فرایند پخت زباله سوز SRU4
۱۶۵.	۱-۹ مقدمه
۱۶۶	۲-۹ گردش جریان گاز اسیدی در واحد بازیافت گوگرد :
۱۶۸	۳-۹ چگونگی راه اندازی واحد بازیافت گوگرد پس از توقفهای کوتاه و طولانی مدت:
۱۷۲	۴-۹ اندازه گیری اثر دمپ‌های کنترل هوا بر دمای داخل زباله سوز
۱۷۷	۵-۹ نتیجه گیری:
۱۸۱	بخش ۲ - شبیه سازی اثر میزان هوای ورودی بر فرایند پخت زباله سوز SRU4
۱۸۶.....	<u>نتیجه گیری و جمع بندی.....</u>

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد  
:



شرکت پالایش گاز خانگیران

## فصل اول:

### مقدمه

## ۱-۱ تاریخچه گاز در ایران

از نوشته‌های تاریخ نویسان کهن چنین بر می‌آید که ایرانیان در استفاده از گاز و دیگر مشتقات نفتی به دیگر ملل جهان پیشی داشته‌اند. به عنوان مثال بقایای آتشکده‌ها و معابدی نظیر آتش جاودانی نزدیک کرکوک که به مشعل بخت النصر معروف بود و در نزدیکی یک مخزن گاز طبیعی قرار داشت، نام برد. همچنین معابد زرتشتیان در نزدیکی مسجد سلیمان و روایت تاریخی که از آتش جاویدان آتشکده آذر گشب در آذربایجان به جا مانده، همگی گواه این مدعا می‌باشد.

مناطق غرب، جنوب و جنوب غربی ایران روی دریایی از نفت و مشتقات آن قرار داشته و دارد. بعضی از این مناطق بدلیل عمق بسیار کمی که داشتند، با فرسایش خاک و یا حرکت گسل‌ها یا عوامل طبیعی دیگر به بیرون تراوش کرده و انسان را به بهره‌برداری از آن سوق می‌داده‌است.

نخستین اسناد تاریخی مربوط به استفاده از گاز در ایران به زمان قاجاریه و سلطنت ناصرالدین شاه (حدود سال ۱۸۷۳ میلادی) می‌رسد و استفاده از آن تا سال ۱۹۰۸ میلادی که نخستین چاه ایران در مسجد سلیمان به نفت رسید، کم و بیش ادامه داشت. پس از استخراج نفت، گاز همراه اجباراً در محل سوزانده می‌شد. شرکت ملی نفت ایران از بدو تشکیل همواره به فکر چاره‌جویی و استفاده از این گاز طبیعی بود. ولی به علت بعد مسافت بین منابع تولید و نقاط مصرف و سنگینی سرمایه‌گذاری و کمی مصرف داخلی که تنها محدود به برخی نقاط نفت خیز جنوب بود. این امر به تعویق افتاد و گازهای استحصالی همچنان سوخته و هدر می‌رفت. به طوری که در طی ۶۰ سال طبق امار متجاوز از ۱۳۰ میلیارد مترمکعب گاز که از نظر حرارتی معادل ۱۳۰ میلیون تن نفت خام می‌شد به طور اجباری سوزانده شده و از بین رفته است.

به تدریج که صنایع نفتی یکی پس از دیگری احداث و به بهره‌برداری می‌رسید، استفاده از گاز طبیعی برای تأمین سوخت، محرکه‌های کمپرسورها، مولدهای برق و مصارف داخلی منازل سازمانی در مناطق نفت خیز از جمله مسجد سلیمان، آغاچاری، هفتگل، و آبادان مورد توجه قرار گرفت و در کنار فعالیتهای اصلی تولید، انتقال و پالایش، فعالیتهای محدودی نیز برای به عمل آوردن گاز طبیعی توسط شرکتهای عامل در حوزه قرار داد انجام گرفت. اولین استفاده از گاز طبیعی در خارج از حوزه مناطق نفت

خیز برای تغذیه کارخانه جدیدالتاسیس مجتمع کود شیمیایی شیراز بود. در حدود ۳۰ تا ۴۰ سال پیش تلاشهای جدی شرکت ملی نفت ایران موجبات فنی و اقتصادی لازم را برای مهار کردن گازهای همراه، جلوگیری از اتلاف و سوزاندن آنها، جمع آوری و پالایش، انتقال و صدور و فروش آن فراهم آورد.

زمانی که اندیشه فروش و صدور گاز به خارج از کشور پیش آمد، امور بین الملل شرکت ملی نفت از نقطه نظر مسایل ارزی و فروش و امور مهندسی خط لوله برای مطالعات فنی و اقتصادی طرح فعالیتهایی را آغاز نمودند و امور مهندسی و ساختمانی، مسئولیتهای مرتبط به خط لوله سراسری اول موسوم به IGAT1 را به عهده گرفت. ولی از آن جایی که کلیه امور مرتبط به گاز باید در یک سازمان متشکل و منسجم قرار می گرفت تا مسئولیتها و اهداف پیگیری و اجرا کند و همچنین توافق کلی در زمینه توسعه همکاریهای اقتصادی بین ایران و شوروی (سابق) در سال ۱۳۴۴ هجری شمسی (۱۹۶۵م) و امضای پروتکل مورخه دی ماه همان سال در زمینه صدور گاز ایران به شوروی در قبال ایجاد صنایعی مانند کارخانه ذوب آهن اصفهان و ماشین سازی اراک سبب شد که شرکت ملی گاز ایران در اسفند ماه سال ۱۳۴۴ تاسیس شود.

لازم به ذکر است که نخستین پالایشگاه گاز ایران در بید بلند به منظور تهیه گاز صادراتی ایران به شوروی تأسیس شد. همچنین نخستین خط لوله سراسری گاز به طول ۱۱۰۶ کیلومتر نیز به این خاطر احداث گردید که گاز طبیعی صادراتی به شوروی از پالایشگاه بید بلند به آستارا در مرز کشور برساند. در حقیقت تأسیس پالایشگاه بید بلند و احداث خط لوله سراسری اول و صدور گاز به اتحادیه جماهیر شوروی که در مورخه ۱۳۴۹/۸/۶ طی مراسمی رسماً آغاز شد، سرآغاز فعالیت گاز در ایران بود.



## ۲-۱ فعالیتهای اکتشافی در منطقه گازی خانگیران:

منطقه گازی خانگیران در ۳۵ کیلومتری شهر سرخس واقع در شمال شرقی استان خراسان و در فاصله ۱۳۵ کیلومتری شهر مقدس مشهد قرار دارد. تاقدیس خانگیران در شمال شرقی کشور در ناحیه سرخس از نظر زمین شناسی و حوزه رسوبی کپه داغ هزار مسجد قرار دارد. حوزه رسوبی کپه داغ با رسوبات ضخیم دریایی منطقه جالبی از لحاظ اکتشافات نفتی است. نخستین گز زمین شناسی بصورت برداشت ابتدایی در سال ۱۳۱۶ انجام شده است. برنامه های پیگیری اکتشافی با عملیات زمین شناسی در سال ۱۳۴۰ آغاز و طی دو ماه کار صحرایی مقاطع دقیق چینه شناسی اندازی گیری و واحدهای سنگی سازنده معرفی و نامگذاری گردید و پیشنهاد ادامه عملیات اکتشافی و نقشه برداری ساختمانی تاقدیس خانگیران داده شد. پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی لازم در سال ۱۳۴۱ طی دو ماه کار صحرایی نقشه ساختمانی از تاقدیس تهیه گردید. در گزارش زمین شناسی مربوطه، سنگ آهک مزدوران (ژوراسیک فوقانی) به عنوان هدف اصلی معرفی شد. در همین گزارش امکان یافتن هیدروکربور در ماسه سنگهای رسوبات قاره ای شوربچه (کرتاسه تحتانی) برای اولین بار مطرح شد. در این گزارش انجام عملیات لرزه نگاری و حفر یک حلقه چاه اکتشافی بر روی این تاقدیس که هدف اصلی آن سنگ آهک مزدوران باشد، پیشنهاد شده بود.

عملیات ثقل سنجی در سال ۱۳۳۹ در محدوده ای به وسعت ۱۸۴۰ کیلومتر مربع انجام و اولین عملیات لرزه نگاری بر اساس نتایج حاصل از عملیات زمین شناسی و ثقل سنجی در اردیبهشت ماه سال ۱۳۴۵ شروع و تا اسفند ماه همان سال ادامه داشت. پس از اکتشاف میدان گازی خانگیران، برای حل پاره ای از مشکلات ساختمانی و تحت پوشش در آوردن مناطق جنوبی دشت سرخس، عملیات لرزه نگاری توسط گروه لرزه نگاری اکتشاف و استخراج شرکت ملی نفت ایران در مردادماه سال ۱۳۵۳ آغاز و پس از برداشت ۷۱۱ کیلومتر مقاطع لرزه نگاری با پوشش ششصد درصد و تحت پوشش در آوردن ناحیه ای به وسعت ۳۵۰۰ کیلومتر مربع در مهرماه ۱۳۵۵ خاتمه یافت. در نتیجه این عملیات، تصویر دقیق تری از

وضعیت ساختمانی دو تاقدیس خانگیران و گنبدلی بدست آمد و تاقدیس کوچک سنگه نیز در بخش جنوبی دشت سرخس کشف شد.

حفر اولین چاه اکتشافی بر روی تاقدیس خانگیران در سال ۱۳۴۷ شروع و به عمق نهایی ۳۵۱۱ متری رسید. در این چاه ۴۸۸ متر از سنگ آهک مزدوران که سنگ مخزن اصلی بود، حفاری گردید. حفر این چاه وجود گاز شیرین در ماسه سنگ شوربجه و گاز ترش در سنگ آهن مزدوران را ثابت نمود. طبق آزمایشات اولیه بهره دهی چاه حدود ۲۹ میلیون فوت مکعب در روز از مخزن مزدوران بوده و بهره دهی مخزن شوربجه حدود ۱۰-۸ میلیون فوت مکعب در روز گزارش شده است. حفاری دومین چاه خانگیران در اسفندماه ۱۳۴۸ آغاز و در مرداد ۱۳۴۹ به عمق نهایی ۳۵۰۹ رسید. آزمایشات انجام شده وجود گاز ترش در سنگ مخزن مزدوران و گاز شیرین در سنگ مخزن شوربجه را تایید نمود. پس از حفر دو چاه ذکر شده برای گاز رسانی به شهر مشهد تصمیم به بهره برداری از مخزن شوربجه گرفته شد. عملیات گازرسانی از سال ۱۳۴۷ با تولید روزانه ۳۰ میلیون فوت مکعب گاز آغاز و با تغییراتی که بعداً صورت گرفت مقدار تولید به ۷۰ میلیون فوت مکعب گاز در روز افزایش یافته است. گاز تولیدی برای مصارف صنعتی و خانگی در شهر مشهد مورد استفاده قرار گرفته و از جمله تامین سوخت سازمان برق منطقه ای استان خراسان و کارخانجات قند و سیمان بوده است.

### ۳-۱ شرکت پالایش گاز شهید هاشمی نژاد (خانگیران):

پالایشگاه گاز خانگیران (شهید هاشمی نژاد) به منظور جداسازی گوگرد از گاز ترش میدان مزدوران در حدود ۳۰ کیلومتری شهر سرخس نزدیک روستای گنبدلی احداث گردید. مساحت پالایشگاه در حدود یک کیلومتر مربع می باشد. طراحی پالایشگاه گاز خانگیران بر عهده یک شرکت آمریکایی به نام "DAVY POWER GAS" و عملیات نصب و اجرای آن توسط شرکت ایتالیایی "SAIPEM" بوده است. عملیات اجرایی پالایشگاه گاز خانگیران در فروردین ماه ۱۳۵۶ و عملیات اجرایی جمع آوری گاز در تیرماه همان سال شروع شد. بعد از پیروزی انقلاب و قطع روابط با متخصصین مشاور کلیه خدمات فوق الذکر توسط مهندسان ایرانی انجام گرفت.

پالایشگاه گاز شهید هاشمی نژاد با هدف بهره برداری از مخازن گاز شمال شرقی کشور در بهمن ماه ۱۳۶۲ با حضور حضرت آیت ... خامنه ای (رئیس جمهوری وقت) افتتاح گردید. مرحله نخست این پالایشگاه با ظرفیت تصفیه ۲۵ میلیون متر مکعب گاز ترش در روز حدود ۱۵٪ گاز مصرفی کشور را برای ۷۰۰ هزار مشترک ساکن در استانهای خراسان، گلستان، مازندران و سمنان تامین می نماید. نظر به ترش بودن بخش قابل توجهی از گاز تحویلی به پالایشگاه، گازهای اسیدی در دو واحد گوگرد سازی با ظرفیت اسمی ۱۳۰۰ تن در روز و خلوص ۹۹/۹ درصد تبدیل به گوگرد می شوند.

شرکت ملی گاز ایران با هدف ازدیاد برداشت از ذخایر گازی منطقه به منظور تامین گاز مصرفی مورد نیاز برنامه های توسعه ای نسبت به طراحی و احداث دو واحد جدید پالایش گاز و یک واحد جدید بازیافت گوگرد اقدام کرده است. این فعالیتها به منظور پالایش و انتقال حدود ۱۷ میلیون متر مکعب در روز به شبکه گازرسانی کشور و همچنین تولید ۶۵۰ تن گوگرد در روز تحت عنوان مرحله دوم طرح شرکت پالایش گاز شهید هاشمی نژاد (خانگیران) سازماندهی و به اجرا گذاشته شد.

این طرح شامل دو واحد پالایش گاز هر کدام با ظرفیت دریافت ۸/۴ میلیون متر مکعب گاز ترش در روز، یک واحد بازیافت گوگرد با ظرفیت ۶۵۰ تن در روز و تاسیسات جانبی از قبیل دو دستگاه دیگ بخار هر کدام با ظرفیت ۹۰ تن در ساعت، یک توربین بخاری جدید برق با ظرفیت ۷/۵ مگاوات و همچنین سیستم برجهای خنک کننده آب و سایر تاسیسات می باشند. با احداث فاز دوم، ظرفیت گاز قابل تصفیه تا چهل و دو میلیون متر مکعب در روز و تولید گوگرد تا ۱۹۵۰ تن در روز افزایش یافته است. همچنین به منظور جلوگیری از آلودگی محیط زیست به هنگام تعمیرات اساسی واحدهای بازیافت گوگرد، واحد چهارم بازیافت گوگرد با ظرفیت تولید ۶۵۰ تن گوگرد در روز احداث گردید. تاسیسات عمده پالایشگاه گاز خانگیران شامل موارد زیر می باشد:

- ۵ واحد تصفیه گاز.
- ۴ واحد بازیافت گوگرد
- نیروگاه، شامل ۳ توربین گازی و ۲ توربین بخار
- واحد بخار شامل ۶ دیگ بخار فشار قوی با ظرفیت ۳۶۰ تن در ساعت ( $321^{\circ}C$  ,  $38 \text{ kg / cm}^2$ ).

- واحد تثبیت مایعات نفتی
- تاسیسات آب پالایشگاه
- واحد تعمیرات
- سرویس های جنبی

#### ۴-۱ فرآیند تصفیه گاز در پالایشگاه خانگیران

واحد تصفیه گاز: وظیفه واحد تصفیه گاز جداسازی اسیدی و کنترل نقطه شبنم آب و هیدروکربور در گاز خروجی می باشد. گاز ترش پس از خروج از هدرهای واقع در CMF توسط پنج خط لوله ۲۰ اینچ وارد پالایشگاه می شود و هر خط به یکی از واحدهای تصفیه گاز می رسد.

گاز مورد نیاز پالایشگاه ابتدا از اسلاگ گیرها واقع در سیستم جمع آوری گذشته، وارد جدا کننده گاز ورودی در واحد تصفیه گاز (Inlet Gas Filter Separator) می گردد. در این مخزن آب و هیدروکربورهای جدا نشده توسط اسلاگ گیرها ( خصوصاً هنگامی که به هر دلیلی مقادیر زیاد مایعات از سمت مرکز جمع آوری به پالایشگاه منتقل شود گرفته می شود. آب ترش (آبی که هیدروژن سولفور به همراه دارد) پیش از تخلیه به حوضچه تبخیر به واحد جداکننده مواد اسیدی ( واحد آب ترش) جهت جذب هیدروژن سولفور فرستاده می شود. هیدروکربورهای مایع به واحد تثبیت مایعات نفتی ( استابلایزر) منتقل می گردد. گاز پس از گذشتن از جدا کننده گاز ورودی وارد فیلتر گاز ورودی شده تا ذرات مایع باقیمانده گرفته شود. مایعات جدا شده در این فیلتر جهت عملیات بعدی به واحد تثبیت مایعات نفتی فرستاده می شود. توجه به اینکه حداکثر جداسازی مایعات همراه گاز جلوگیری از آلودگی سیستم آمین و به وجود آمدن مشکلات مورد نظر است. در فاز اول پس از فیلتر یک دستگاه کوالیسر نصب شده است. پس از این مرحله گاز جذب و به سیستم آمین هدایت شده تا  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  آن جدا گردد. در سیستم آمین از آمین ۳۴ درصد وزنی در دو برج موازی جذب و در دو برج موازی احیا استفاده می شود، گاز از طریق

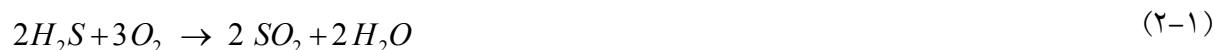
لوله‌های قرینه و مشابه بین دو برج تماس A و B تقسیم می‌گردد. گاز خروجی از سیستم آمین که تقریباً تمامی  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{S}$  خود را از دست داده به طرف واحد نم‌زدایی (کنترل نقطه شبنم) هدایت می‌شود. سیستم کنترل نقطه شبنم از چهار عدد برج خشک کننده با بستر ثابت موبیل سوربید تشکیل شده است. گاز از بالای دو عدد از برج‌ها وارد شده و در طول عبور از بستر موبیل سوربید، آب و هیدروکربورهای سنگین را در بستر، جای می‌گذارد و از انتهای برج‌ها خارج می‌شود. گاز خروجی از برج‌ها سپس وارد فیلتر نهایی (Residue Gas Filter) شده و هر آنچه ذرات جامد، همراه گاز باشد از آن جدا می‌شود سپس گاز جهت خروج از پالایشگاه به خط اصلی انتقال می‌یابد.

#### ۵-۱ واحد بازیافت گوگرد (SULFUR RECOVERY)

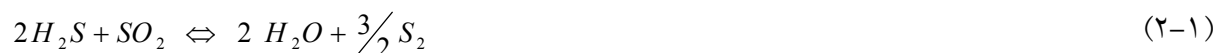
هدف اصلی از بازیافت گوگرد گازهای اسیدی در پالایشگاه خانگیران جلوگیری از آلودگی محیط زیست و تبدیل گازهای سمی به گازهای بی‌خطری که بشود آنها را در فضای اطراف پراکنده نمود، و گرنه بازیافت گوگرد با توجه به دور بودن بازارهای عمده جهانی و وسایل و مواد مصرفی از لحاظ اقتصادی توجیه چندانی ندارد. برای بازیافت گوگرد از گازهای اسیدی از روش معمول و کاربردی که اولین بار توسط دانشمندی به نام کلاوس (Clous) ابداع شد و نسبت به روش‌های دیگر اقتصادی تر می‌باشد، استفاده می‌شود. مزیت روش کلاوس بر سایر روش‌ها در ایجاد گرمای مفیدی است که برای تولید بخار آب به کار می‌رود. از نقطه نظر شیمیایی هدف اکسید کردن هیدروژن سولفور (H<sub>2</sub>S) و تبدیل آن به گوگرد S و آب (H<sub>2</sub>O) می‌باشد.



البته این واکنش در یک مرحله انجام نمی‌گیرد و دو مرحله‌ای است، در مرحله اول یک سوم از گاز اسیدی با تمامی هوای لازم سوزانده می‌شود که تولید (SO<sub>2</sub>) و (H<sub>2</sub>O) می‌نماید.



دو سوم باقی مانده گاز اسیدی مستقیماً وارد کوره واکنش (Reactor Furnace) می شود. در کوره واکنش گازهای سوزانده نشده با  $SO_2$  حاصل از واکنش پیشین ترکیب شده و تولید عنصر گوگرد می نماید.



توضیح اینکه کوره واکنش شامل دو قسمت کوره و راکتور می باشد. در کوره یک سوم گازهای اسیدی سوزانده شده و دو سوم باقیمانده با محصولات واکنش های پیشین در کوره با هم ترکیب می گردند.

۶۰٪ کل واکنش ها در کوره واکنش صورت می گیرد و ۴۰٪ باقیمانده در بسترهای کاتولیتی مراحل بعد انجام می شود. حدود پنجاه واکنش فرعی در کوره واکنش انجام می شود که گازهای تولیدی عمده آنها عبارتند از  $H_2S$ ،  $N_2$ ،  $CO_2$ ،  $S_2$ ،  $COS$ ،  $CS_2$ ،  $H_2$ ،  $H_2S$  و  $SO_2$ . حدود ۵۴ درصد از مجموع کل گوگرد تولیدی واحد، به صورت بخار عنصر گوگرد در کوره واکنش تشکیل می گردد. در مراحل بعدی جهت تشکیل گوگرد، کارهای مشکل تری انجام می شود تا عملیات بازیافت گوگرد تقریباً کامل گردد. برای این کار ابتدا گاز خروجی از راکتور در بویلر سرد کننده گوگرد (Weast heat bailer) W.H.B سرد شده و گوگرد خنک شده از آن خارج می شود. در مراحل بعد طی سه مرحله متوالی عمل دوباره گرم کردن (Reheating)، تبدیل (Converting) و سرد کردن (Condensing) انجام می گیرد.

#### ۶-۱ گردش جریان گاز اسیدی در واحد بازیافت گوگرد :

گاز اسیدی از طریق لوله جمع آوری کننده اصلی ۴۲ اینچ، که گازهای اسیدی واحد تصفیه را به واحد بازیافت گوگرد حمل می کند وارد تفکیک کننده گازهای اسیدی<sup>۱</sup> (A1-2227-02) می شود. سپس گازهای اسیدی از بالای این دستگاه خارج شده و وارد کوره واکنش می گردند (۱-۱۵۰۱-۰۲).

یک سوم گازهای اسیدی وارد کوره و دو سوم دیگر آن وارد راکتور می گردند و در آنجا با هوای کنترل شده ای که از دمنده های هوای (A,B1-1301-02) تأمین می گردد سوزانده می شوند. واکنش های داخل

<sup>1</sup> Acid gas knock out drum

محفظه احتراق نسبت به زمان مناسبی که در طرحی پیش‌بینی شده به حالت تعادل نزدیک می‌شوند و در نتیجه ۵۴٪ از  $H_2S$  داخل گازهای اسیدی در راکتور به صورت عنصر گوگرد در می‌آید. ۴۶٪ باقیمانده بیشتر به صورت  $SO_2$  و  $H_2S$  ظاهر می‌گردد. هیدروکربن‌های داخل گازهای اسیدی با اکسیژن ترکیب شده و تشکیل  $CO_2$ ،  $CO$ ،  $H_2O$  داده که به همراه واکنش‌های جانبی، تولید  $CS_2$  و  $COS$  می‌نماید. تمامی این عملیات همزمان انجام می‌شود.

$CS_2$  و  $COS$  تشکیل شده، در مراحل بعد با هیدرولیزه شدن در قسمت پایین مبدل‌ها (Converters) از بین می‌روند. گرمای ایجاد شده در محفظه احتراق در W.H.B جذب شده و در آنجا تولید بخار آب اشباع شده با فشار متوسط MP می‌کند که به مصرف نیروی محرکه دمنده‌های هوای خود واحد می‌رسد. گاز حاصل از محفظه احتراق به دو قسمت تقسیم می‌گردد: یک مسیر اصلی و یک مسیر فرعی. مسیر اصلی از داخل تیوب‌های W.H.B می‌گذرد که در آنجا مقداری از بخار گوگرد (۱۵٪) سرد شده و از طریق سیل پات ۴ اینچ خود (Seal Pot) به حوضچه ذخیره گوگرد (SULFUR Pit) ریخته می‌شود. سپس از طریق لاین ۶۲ اینچ وارد دستگاه جداکننده گوگرد مذاب (COLESER) می‌شود تا قطرات گوگرد مایه که همراه گاز است از آن جدا گردد.

مسیر فرعی یک لاین ۲۴ اینچ می‌باشد که گاز گرم محفظه احتراق را به مخلوط کن (MIXER) می‌رساند. این مقدار گاز گرم باعث می‌شود که گازهای خروجی از جداکننده گوگرد مذاب ۲۲۲۳ که تا حدودی دمای خود را از دست داده‌اند دوباره گرم شوند. لاین ۲۴ اینچ فرعی هات گاز لاین (Hot Gas Line) نام دارد. گازهای مخلوط و گرم شده از میکسر به مبدل می‌رسند و از بستر کاتالیزوری آن که از کوبالت مولیبدن و آلومینیوم دی‌اکسید تشکیل شده عبور می‌کند. سپس وارد مبرد گوگرد (Condenser) می‌گردد. این دستگاه ضمن مایع کردن قسمتی از بخار گوگرد و هدایت آن به حوضچه، با گرفتن گرمای آنها تولید بخار فشار ضعیف LP می‌نماید. سپس از (Coaleser) عبور می‌نماید که کار این دستگاه مشابه سایر کوالیسرها می‌باشد.

گازهای اسیدی بعد از گذشتن از این مرحله وارد کوره کمکی مرحله دوم می‌شود. سپس از مبرد گوگرد مرحله دوم می‌گذرد که این مبرد نیز تولید بخار آب LP می‌نماید. البته پیش از آن در بستر کاتالیزور

مبدل عبور کرده. بعد از گذشتن از کوالیسر گازها مجدداً در کوره کمکی مرحله سوم گرم می‌شود و از مسیر کاتالیزوری مرحله سوم عبور نموده و سرانجام از مبرد گوگرد مرحله سوم و جداکننده گوگرد مذاب عبور می‌کند. طی این سه مرحله در ۸ ایستگاه و از طریق ۱۱ عدد سیل پات گوگرد مذاب بازیافت شده به حوضچه می‌ریزد.

کندانسر مرحله سوم بخار آبی با فشار خیلی پایین، حدود  $(9/14 \text{ psi} / \text{kg/Cm}^2)$  تولید می‌کند. این بخار آب در خنک کننده هوایی (به صورت مایع درآمده و در مخزن آب مقطر مبرد گوگرد مرحله سوم جمع‌آوری شده و سپس به وسیله پمپ‌های آب مقطر به مخزن بخار آب مبرد گوگرد برگشت داده می‌شود. سرانجام گازهای اسیدی خروجی از کوالیسر مرحله سوم برای احتراق و سوزانده شدن  $\text{H}_2\text{S}$  و بخار گوگرد باقیمانده در این گازها وارد زباله سوز با دمای حدود  $650^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد شده و از آنجا وارد دودکش (Stack) می‌گردد تا در فضا پخش شود.

#### ۷-۱ سیستم فلرینگ در پالایشگاه

عدم تعادل بین تولید و مصرف سوخت گازی در یک پالایشگاه گاز و وجود سوخت گازی مازاد بر مصرف سبب می‌شود که این سوخت گازی اضافه از طریق سیستم فلر سوزانده شود. این واحد به منظور جلوگیری از آلودگی محیط زیست در نظر گرفته شده است.

فلر پالایشگاه خانگیران، از نوع فلرهای هوایی بوده که در ارتفاع حدود ۶۳ متر از سطح زمین قرار گرفته است. معمولاً در فلرها، بخش انتهایی فلر که در معرض حرارت ناشی از مشعل فلر می‌باشند، بدلیل جوگیری از برخورد مستقیم شعله بدنه فلزی، با سیمان مخصوص، پوشش داده می‌شود. در پالایشگاه خانگیران بدلیل احتراق گازهای ترش ( حاوی گوگرد) انتخاب مواد از اهیت خاصی برخوردار است. ترکیبات گوگردی در تماس با قطعات فلزی فلر در دمای حدود  $350^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به شدت مقاومت خود را از دست داده و می‌تواند دار تغییر شکلهای دائمی و از هم گسیختگی گردند.



در این فلر ( در فلرهای هوایی) هوای مورد نیاز برای احتراق تنها از محیط اطراف تامین می گردد و بر خلاف فلر هوا کمک که هوای احتراق توسط فن بداخل دهانه فلر دمیده می شود، بسیار دودزا است. مشخصات فلر در بخش شبیه سازی فلر بصورت کامل آورده شده است.

### ۱-۱-۱ سیستم فلر :

این سیستم از دو شبکه مجزا جهت جمع آوری گازهای هیدروکربن پرفشار و کم فشار جهت سوزاندن آنها تشکیل شده است. هیدروکربنهای جمع آوری شده در هر شبکه به یک مخزن مایع گیر S-841/842 منتهی می شوند مایعات جدا شده از گازها و بخارات در این مخازن با فشار ثقل خود به مخزن جمع آوری هیدروکربنهای مایع S-843/844/845 در سیستم حوضچه سوزان ارسال می شود و گازها و بخارات باقی مانده در برج سوزانده می شوند. برای روشن نگهداشتن دائمی برج سوزان از مخلوط گاز و هوا استفاده می شود که خود بوسیله جرعه زدن (توسط پکیج جرعه زنی) روشن می گردند. مخازن مایع گیر برج سوزان در داخل محوطه پالایشگاه قرار گرفته اند. خود برج سوزان بفاصله ۶۰۰-۵۰۰ متری این مخازن در محوطه محصور دیگری نصب شده است. این برج سوزان (فلر) از نوع خود ایستا و بر روی فونداسیون مسلح مرکزی قرار گرفته است. واحد شیرین سازی نیز دارای یک فلر با شماره مشخصه FL-101 و دارای ارتفاع ۶۵ متر می باشد که با سیم بکسلهای مخصوصی (Guy Rope) در دو ردیف و هر ردیف به تعداد سه عدد تحت زاویه ۱۲۰ درجه نگهداری می گردد. این فلر بر خلاف فلر فاز ۲ پالایشگاه، دارای یک دمنده جهت اضافه نمودن هوا به ترکیب احتراق آن می باشد که هوای مورد نیاز از طریق این دمنده، به قسمت تیپ فلر تزریق می گردد.

### ۱-۱-۲ ترکیبات گاز پالایشگاه

با توجه به وجود چهار نوع ترکیب گاز مختلف در پالایشگاه، گازهای فلش درام، گاز ترش، گاز اسیدی و گاز شیرین که در زیر تذکیر آنها آورده شده است، آنالیز گاز ارسالی به فلر متغیر بوده و بصورت خالص یا مخلوطی از این مخلوطهای گازی می باشد که در جداول ۱ تا ۴ ترکیب این گازها آورده شده است.

جدول ۲ - ترکیب گونه‌های موجود در جریان

سوخت عبوری از فلر - گاز شیرین

گونه	درصد مولی
	۹۸/۵
	-
	-
i	-
	-
	-
	-
	-
	۰/۵۷
	۰/۰۱
	ε ppm
COS	۸ ppm
H2O	۰/۰۱

جدول ۱ - ترکیب گونه‌های موجود در جریان

سوخت عبوری از فلر - گاز ترش

گونه	درصد مولی
	۸۸/۳۸
	۰/۵۶
	۰/۰۹
	۰/۰۲
	۰/۰۳
	۰/۰۲
	۰/۰۲
	۰/۱۰
	۰/۵۲
	۶/۴۱
	۳/۸۵
COS	۸ ppm
H2O	۰/۰۱

جدول ۴ - ترکیب گونه‌های موجود در جریان

سوخت عبوری از فلر - فلش درام

گونه	درصد مولی
	۴۷/۰۷
	۰/۱۶
	۰/۰۰۵۸
i	۰/۰۰۱۹
	-
	-
	-
	-
	۰/۹۴
	۴۰/۸۵

جدول ۳ - ترکیب گونه‌های موجود در جریان

سوخت عبوری از فلر - گاز اسیدی

گونه	درصد مولی
	۱/۰
	-
	-
	-
	-
	-
	-
	-
	-
	۵۶/۳۹

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد



	۸/۰۶
COS	-
H <sub>2</sub> O	۹/۰۵

	۳۳/۹۶
COS	۹۱ ppm
H <sub>2</sub> O	۸/۶۵

دبی عملکردی فلر برای هر نوع گاز ارسالی به فلر مختلف بوده بطوریکه بیشینه مقدار آن برای گاز شیرین 750000Lb/hr ( 428000Nm<sup>3</sup>/hr ) بوده که از حالت 0 تا دبی 200000 Lb/hr (114000Nm<sup>3</sup>/hr) می بایست احتراق آن بطور پیوسته در شرایط بدون دود باشد. این دبی برای شرایط گاز اسیدی (جدول ۳) 140000 Lb/hr (63400Nm<sup>3</sup>/hr) می باشد که فلر می بایست در این شرایط بدون دود بوده و انتشار ترکیبات گوگردی آن در سطح قابل قبول باشد.

بیشینه شدت تابش نباید از 1500BTU/hr ft<sup>2</sup> تجاوز نماید که 300BTU/hr ft<sup>2</sup> مربوط به تابش خورشید می باشد. غلظت گونه های گوگردی نباید از حد مجاز مشخص شده در Texas Air Control Board Regulation تجاوز نماید. بیشینه سرعت باد مجاز برای شرایط گاز شیرین 25 M.P.H (۵۵ متر بر ثانیه) و برای گاز اسیدی 5M.P.H (۱۱ متر بر ثانیه) می باشد. شرایط دمایی گاز در محدوده 30°F تا 50°F متغیر می باشد. همچنین بیشینه سرعت گاز در تیپ فلر ۰/۲ ماخ می باشد.

شرایط نرمال: بر اساس مستندات موجود در پالایشگاه با وجود تغییرات شدید دما (از ۲۹- تا ۷۵ درجه سانتیگراد) و دبی گازهای فلر (از ۲۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ مترمکعب بر ساعت) در شرایط نرمال دمای گاز فرآیند ۳۰ درجه سانتیگراد و دبی آن ۲۵۰۰۰ مترمکعب بر ساعت می باشد.

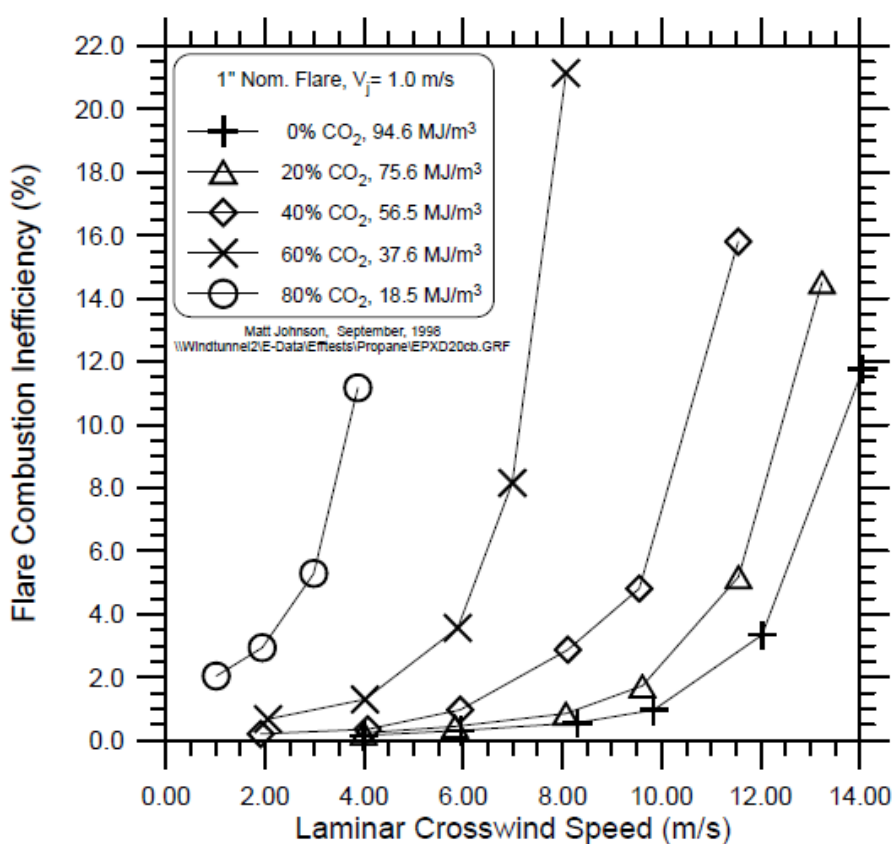
## ۸-۱ مروری بر کارهای انجام شده

با توجه به اهمیت فلرینگ در دنیا از نظر اقتصادی و زیست محیطی، موسسات تحقیقاتی زیادی در حال مطالعه و بهینه‌سازی رفتار فلرها در برابر شرایط محیطی مختلف هستند. تحقیقات انجام گرفته به دو صورت آزمایشگاهی (تجربی) و شبیه‌سازی (عددی) انجام شده‌اند. بررسی‌های تجربی به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و آزمایشگاهی به مطالعه رفتار فلر با ابعاد کوچک در یک تونل باد می‌پردازد. اما در روشهای عددی می‌توان فلر را با اندازه واقعی مورد بررسی قرار داد. در این مطالعات بیشتر به بررسی تأثیر سرعت جریان باد بر شکل و اندازه شعله و نیز بر راندمان احتراق پرداخته می‌شود.

در سال ۱۹۹۸ ماتئو جانسون و همکارانش در پژوهشی تحت عنوان "بازده احتراق شعله پروپان در جریان متقاطع" به بررسی فلرهای با سوخت گازی پروپان تجاری پرداختند. در این کار تأثیر سرعت جریان باد و نیز جریان خروجی گاز فلر بر راندمان احتراق مورد بررسی قرار گرفته است. با تصویر برداری و اندازه‌گیری از تجمع محصولات احتراق در تونل باد، راندمان احتراق در مقادیر مختلف سرعت باد (از ۱ تا ۱۴ متر بر ثانیه) محاسبه شده است. نتایج حاکی از آن است که سرعت جریان باد تأثیر زیادی بر بازده احتراق دارد؛ به طوریکه سرعت باد با توان سوم سرعت گاز خروجی از فلر متناسب است. همچنین با افزایش سرعت خروجی گاز فلر در یک باد مشخص راندمان احتراق افزایش پیدا کرده است. به عنوان بخش دیگری از این تحقیق، گاز پروپان با گاز دی‌اکسید کربن رقیق شد و پس از محاسبه راندمان ملاحظه شد که که با رقیق کردن گاز حساسیت آن نسبت به جریان باد حتی در سرعت‌های کم (۱ تا ۵ متر بر ثانیه) افزایش یافته و در نتیجه راندمان احتراق در این حالت نسبت به شرایطی که سوخت خالص است، کاهش می‌یابد. در شکل (۱-۱) هر چه قدر سرعت باد افزایش یابد، ناکارآمدی افزایش می‌یابد و در صورتیکه گاز پروپان با افزودن دی‌اکسید کربن رقیق شود ناکارآمدی باز هم افزایش می‌یابد.

در سال ۱۹۹۹ جانسون و همکارانش تحقیقاتی در مورد راندمان احتراق فلر که در معرض جریان باد و در یک تونل باد قرار گرفته است، انجام داد. هدف این تحقیق مطالعه اثر جریان های باد متقاطع بر شعله فلر و در محیط اتمسفریک بوده است. گاز انتخاب شده متان و پروپان بوده و سرعت جریان باد از

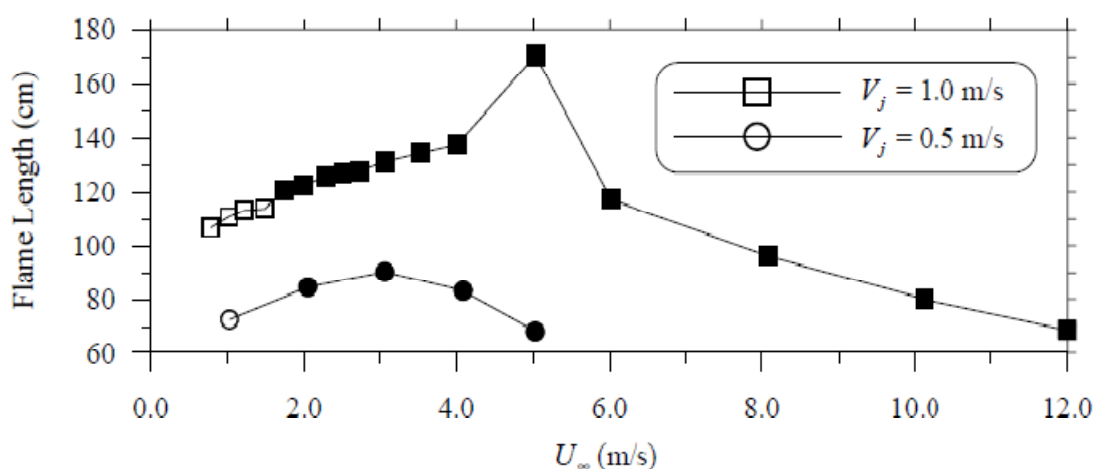
۲ m/s تا ۱۶ m/s متغیر انتخاب شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که راندمان احتراق این شعله ها شدیداً به سرعت جریان باد وابسته اند. با افزایش سرعت خروجی جت گاز کی توان راندمان احتراق را بهبود بخشید. همچنین در این تحقیق نیز اگر سوخت به وسیله افزودن CO<sub>2</sub> رقیق شود، حساسیت راندمان به سرعت باد بیشتر شده و کاهش بیشتری در راندمان را نتیجه می دهد [۳].



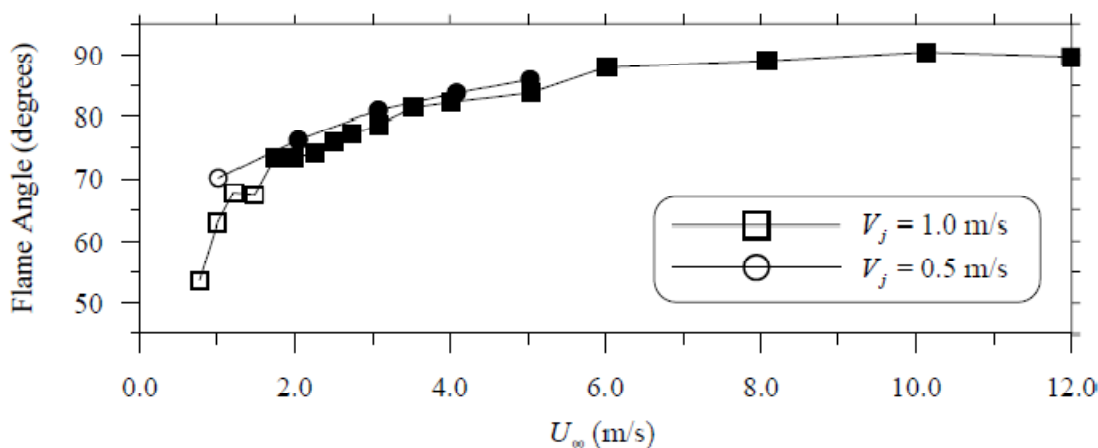
شکل ۱-۱. مقایسه راندمان احتراق در سرعت‌های مختلف باد با درصدهای مختلف دی‌اکسید کربن

آدرین ماجسکی و همکاران در سال ۱۹۹۹ در پژوهشی تحت عنوان "اندازه و مسیر فلر در جریان متقاطع" به مطالعه تاثیر جریان هوا بر شکل شعله فلر پرداخت. وی برای این منظور، از یک سیستم عکس برداری استفاده نمود و بر اساس احتمال وجود شعله در اطراف دهانه فلر عکس شعله را به عنوان نتایج آزمایشگاهی ارائه داد. همچنین طول شعله و زاویه آن نسبت به راستای عمود بر سطح خروجی فلر در

سرعت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در یک سرعت مشخص جریان باد ( $m/s$ )  $V=5$ ، طول شعله ماکزیمم است (شکل ۲-۱). همچنین زاویه شعله رابطه مستقیم به جریان باد دارد. یعنی با افزایش سرعت باد زاویه شعله افزایش یافته تا در نهایت به حالت افقی رسد (شکل ۳-۳). همچنین نشان داده شده است که اگر دبی خروجی جت گاز کاهش یابد (از  $V_j=10\ m/s$  به  $V_j=0.5\ m/s$ ) شعله در سرعت باد زیاد ( $V_j=5\ m/s$ ) از فلر جدا شده و زاویه شعله برای آن قابل تعریف نیست [۴].



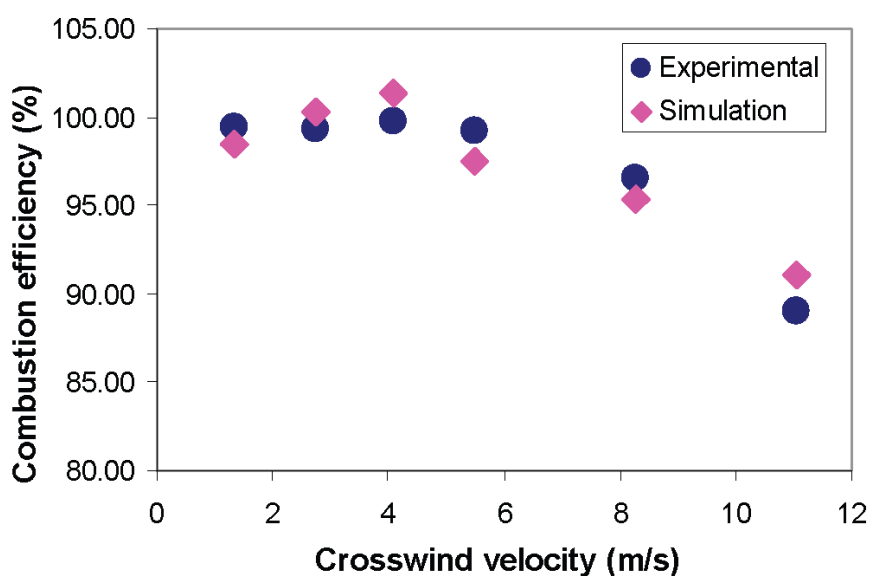
شکل ۲-۱. تغییرات طول شعله در سرعت های مختلف جریان باد



شکل ۳-۱. تغییرات زاویه شعله در سرعت های مختلف جریان باد

دیوید کاستینیریا و توماس ادگار در قالب مطالعه ای در سال ۲۰۰۸ و تحت عنوان "دینامیک سیالات عددی برای شبیه سازی آزمایشات تونل باد بر روی سیستم احتراق فلر" روش های عددی را برای بررسی

پارامترهای تأثیر گذار بر احتراق فلر به کار بردند. آن‌ها برای این کار از نرم افزار تجاری فلوئنت استفاده کردند و برای پرهیز از افزایش محاسباتی که تأثیری بر نتایج ندارد، تنها به مدل کردن یک بخش مکعب مستطیلی در اطراف فلر پرداختند. در این مطالعه به علت از نیروهای شناوری صرف نظر شده است، در سرعت‌های کم جریان باد ( ۱ تا ۴ متر بر ثانیه)، که تأثیر نیروهای شناوری چشمگیر است، شکل شعله شبیه‌سازی شده اختلاف زیادی با واقعیت نشان می‌دهد اما با افزایش سرعت جریان باد نتایج شبیه‌سازی سازگاری بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند (شکل ۱-۴). نتایج راندمان حاصل از شبیه‌سازی نیز بسیار نزدیک به مقادیر تجربی آن‌ها محاسبه شده اند. پس از اطمینان از دقت حل عددی، فلری با ابعاد واقعی و در مرکز تحقیقات انرژی CANMET مورد مطالعه قرار گرفته است. راندمان حاصل از نتایج شبیه‌سازی در این حالت نیز اختلاف ناچیزی با نتایج آزمایشگاهی انجام گرفته توسط این مرکز دارد. همچنین نتایج نشان‌دهنده آن است که در سرعت‌های زیاد جریان باد (۱۱ متر بر ثانیه)، بر راندمان احتراق بسیار تأثیر گذار است و به سبب کاهش میزان دی‌اکسید کربن تشکیل شده، راندمان کاهش می‌یابد [۶].



شکل ۱-۴. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی راندمان احتراق

## **فصل دوم:**

### **آشنایی با فلر و انواع آن**



۱-۲ مقدمه

طبق آمارهای گزارش شده، در دنیا سالانه بیش از ۱۶۸ میلیارد مترمکعب گاز طبیعی در فلرها سوزانده می شود [۶]. لذا شناخت و مطالعه عملکرد فلرها و بهینه سازی آنها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. فلر برجی است که در آن گازهای اتلافی و یا زائد که توجیه عملی برای استفاده و یا انتقال ندارند و یا ممکن است خطراتی را متوجه سیستم نمایند، سوزانده می شوند (شکل ۱-۲). نشت این گازها به محیط می تواند منجر به صدمه رسیدن به تجهیزات، آلودگی محیط زیست و همچنین صدمات احتمالی به انسان گردد. لذا مهار این گازها از اهمیت بسزایی برخوردار است.



شکل ۱-۲. نمونه ای از انواع فلرها

به طور کلی فلرینگ دو هدف عمده را دنبال می کند:

- سوزاندن گازهای زائد و اتلافی: برای مثال گازهای زائدی که در پالایشگاهها توجیه اقتصادی برای استفاده و بهره برداری ندارند، در فلر سوزانده می شوند. و یا گاز متان شکل گرفته در لندفیلدها که از تجزیه مواد آلی حاصل می شود، با فلرینگ به گاز دی اکسید کربن که با محیط



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

زیست سازگاری بیشتری دارد، تبدیل می شوند. (سوزاندن متان منجر به تولید حرارت، آب، و  $CO_2$  می شود. بر اساس گزارش IPCC اثرات گلخانه‌ای گاز متان ۲۳ برابر گاز  $CO_2$  می‌باشد [۷].)

- حفاظت از سیستم در مقابل تغییرات ناگهانی فشار در سیستم: افزایش ناگهانی فشار در یکی از تجهیزات مجموعه که عموماً در هنگام شروع به کار (startup) و توقف (shutdown) سیستم رخ می‌دهد، توسط شیرهای فشار شکن خنثی شده و گازهای اضافی موجود در فلر سوزانده می‌شوند. به عبارت دیگر در اینجا فلر نقش یک سوپاپ اطمینان را بر عهده داشته و از بروز صدمات جدی به سیستم جلوگیری می‌کند.

از فلرینگ به صورت گسترده‌ای در پالایشگاهها، مخازن نفت و گاز، منابع گاز طبیعی، صنایع شیمیایی و پتروشیمی و لندفیلدهای بیوگاز استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای فلر می‌توان به سوزاندن گازهای زائد در دایجسترهای بیوگاز، تبدیل ذغال سنگ به گاز، آزمایش موتور موشک، نیروگاههای هسته‌ای، مبدل‌های حرارتی آب، نیروگاههای آبی بزرگ و صنایع تولید کودهای آمونیاکی اشاره نمود [۸]. در یک فرآیند فلرینگ ایده‌آل مطلوبست تمامی هیدروکربن‌های موجود در گازهای زائد به دی‌اکسیدکربن و بخار آب و تمامی ترکیبات گوگردار مانند سولفید هیدروژن، به  $SO_2$  تبدیل شوند. همچنین دیگر اکسیدها، مانند اکسیدهای ازت و یا مواد نیمه‌اکسید مانند مونوکسیدکربن و یا فورمالدهیدها به عنوان محصول نامطلوب فلرینگ قلمداد می‌شوند که باید با طراحی مناسب فلر از تولید آنها جلوگیری نمود.

## ۲-۲ ساختار فلر

بخش‌های اصلی یک فلر در شکل‌های ۲-۲ و ۳-۲ نمایش داده شده است که مختصراً در زیر به توضیح آنها پرداخته خواهد شد.



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

## ۲-۲-۱ خطوط انتقال گاز (Gas Transport Piping)

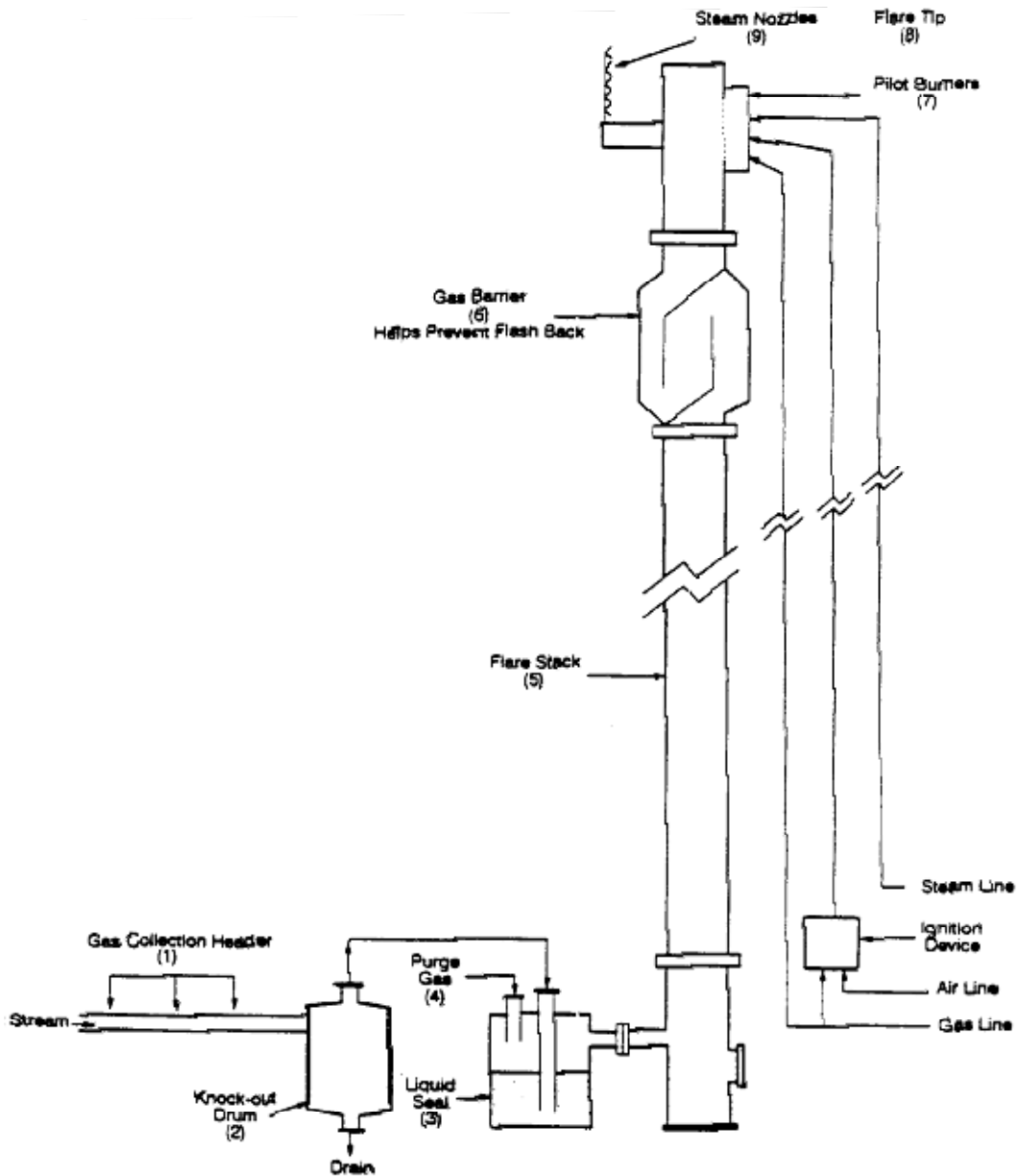
جنس خطوط لوله‌ای که برای انتقال گازهای زائد از محل تولید به محل فلرینگ مورد نیاز است باید به گونه‌ای باشد که کمترین افت فشار را به همراه داشته باشد. (عموماً از فولاد سخت ۴۰ برای این منظور استفاده می‌شود) همچنین باید تا حد امکان از شیرها و اتصالات کمتری استفاده نمود تا افت فشار به کمترین میزان خود برسد. این خطوط باید به نحوی طراحی شوند که امکان پاک‌سازی آنها وجود داشته باشد تا از تجمع مواد خورنده و اشتعال‌زا در آنها، چه در شروع کار و چه در حین فرایند فلرینگ، و در نتیجه وقوع انفجار جلوگیری شود و همچنین امکان تجمع مایعات موجود در جریان گاز و یا ناشی از تقطیر آن وجود نداشته باشد.

## ۲-۲-۲ مخزن تخلیه (Knock-out Drum)

مایعات موجود در جریان گاز زائد و یا مایعاتی که از تقطیر جریان گاز در حین انتقال به فلر ایجاد می‌شوند، در مخزن تخلیه جمع‌آوری می‌شوند. این مایعات موجب خاموش شدن شعله و یا اختلال در فرایند احتراق و در نتیجه تولید دود می‌گردند. همچنین وجود این مایعات ممکن است باعث تولید جریانی از مواد شیمیایی محترق گردد که در صورت رسیدن به سطح زمین بسیار خطرناک خواهد بود. مخزن تخلیه معمولاً یک مخزن افقی یا عمودی است که در محل پایه فلر و یا در نزدیکی آن نصب می‌شود. این مخزن همچنین می‌تواند به صورت عمودی در داخل پایه فلر قرار گیرد. (شکل ۲-۴)

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

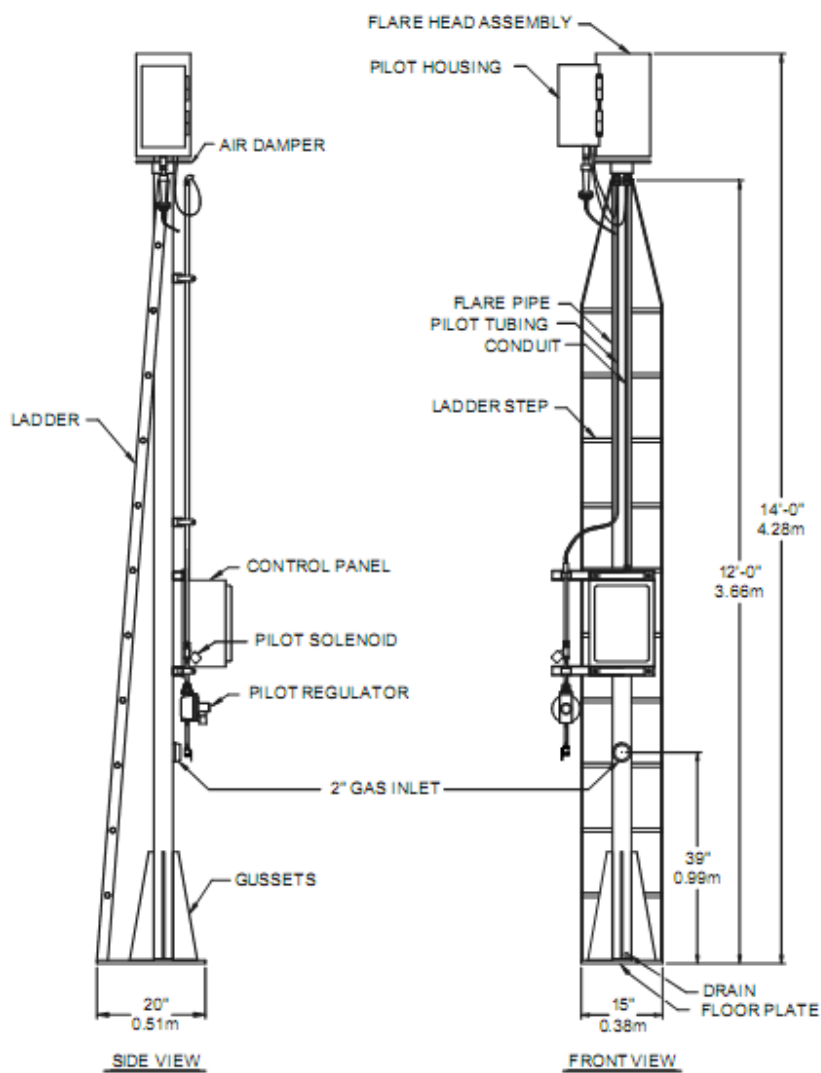
عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



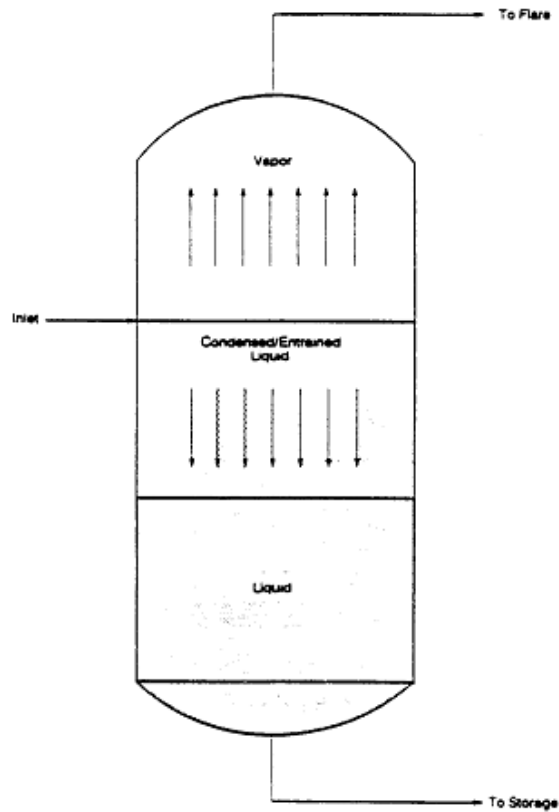
شکل ۲-۲. ساختمان یک فلر

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



شکل ۲-۳. نمای جانبی و روبرویی از یک فلر



شکل ۲-۴. نمایی از یک مخزن تخلیه (knock-out drum) عمودی

### ۳-۲-۲ آب بند مایع (Liquid Seal)

گازهای زائد پیش از اینکه وارد برج فلر شوند، معمولاً از داخل یک آب بند مایع عبور می‌کنند. این آب بند می‌تواند در پایین دست مخزن تخلیه و یا چسبیده به آن قرار گیرد. گاه ممکن است هوا به نحوی به سیستم فلر نفوذ کرده و پیشانی شعله نیز بداخل برج فلر کشیده شود. در این حالت اصطلاحاً با پدیده‌ی برگشت شعله (flame flashback) که پدیده‌ای خطرناک است، مواجه هستیم. وظیفه آب بند جلوگیری از برگشت شعله و خطرات ناشی از آن می‌باشد. البته تجهیزات دیگری همچون flame

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد



عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

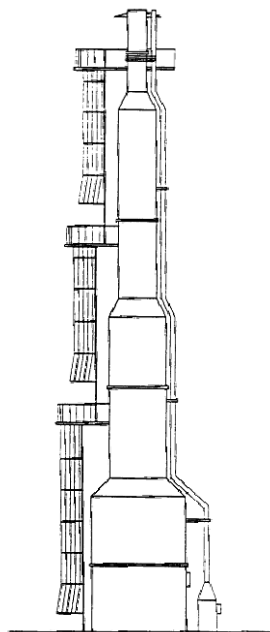
arrester و شیرهای اطمینان نیز می‌توانند برای جلوگیری از پدیده برگشت شعله به کار گرفته شوند. آب‌بند همچنین نقش یک میراکننده مکانیکی را در برج فلر ایفا می‌کند که وظیفه‌ی مبراکردن شوک‌های ناشی از انفجار را بر عهده دارد. علاوه بر این، وجود آب‌بند باعث می‌شود که همواره در بالادست سیستم یک فشار مثبت وجود داشته باشد.

#### ۲-۲-۴ دودکش

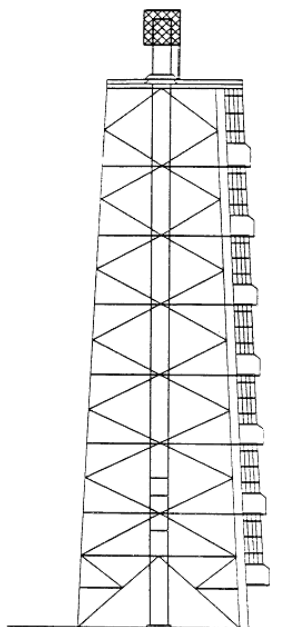
فلرینگ باید در ناحیه‌ای صورت گیرد که به افراد و تجهیزات پیرامون خود هیچگونه آسیبی نرساند. یکی از راههای تحقق این موضوع استفاده از یک دودکش بلند می‌باشد. دودکش فلر به سه طریق می‌تواند تقویت و مهار شده و پایدار گردد که در شکل ۲-۵ آورده شده است. از فلرهای خودمهار (self-supported elevated flare) (شکل ۲-۵ الف) در برج‌های فلرینگ کم ارتفاع (۳۰-۱۰۰ فوت) استفاده می‌شود، البته این دودکش‌ها تا ارتفاع ۲۵۰ فوتی نیز قابل طراحی می‌باشند. از فلرهایی که توسط سیم مهار می‌شوند (guy-supported elevated flare) (شکل ۲-۵ پ) برای ارتفاعهای بیش از ۳۰۰ فوتی و از فلرهای دریک (derrick-supported elevated flare) (شکل ۲-۵ ب) برای ارتفاعهای بالای ۲۰۰ فوت استفاده می‌شود.

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

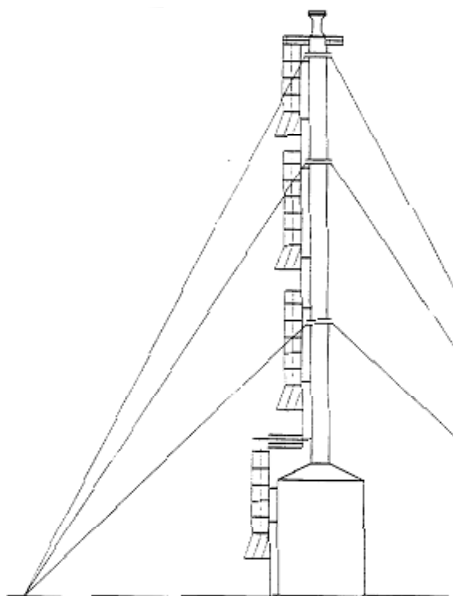
عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



الف) self-supported elevated flare



ب) Derrick-supported elevated flare



پ) guy-supported elevated flare

شکل ۲-۳. روش‌های مختلف مهار کردن دودکش فلر





عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

## ۲-۲-۵ آب بند گاز (Gas Seal)

هوا می‌تواند به دلایلی همچون وزش باد و یا انقباض دمایی گاز فلر به داخل برج فلر کشیده شود و باعث وقوع انفجار گردد. برای جلوگیری از این موضوع از یک آب‌بند گاز در دودکش فلر استفاده می‌شود. نوعی از این آب‌بندها در زیر نوک فلر نصب می‌شوند تا از نفوذ هوا به داخل شبکه فلر جلوگیری کنند. دسته دیگری از آنها، تحت عنوان آب‌بندهای داخلی، در بالای دودکش نصب شده و همچون یک اوریفیس عمل می‌کنند. عموماً در طراحی فلرها از آب‌بندهای داخلی استفاده می‌شود.

## ۲-۲-۶ مشعل (Burner Tip)

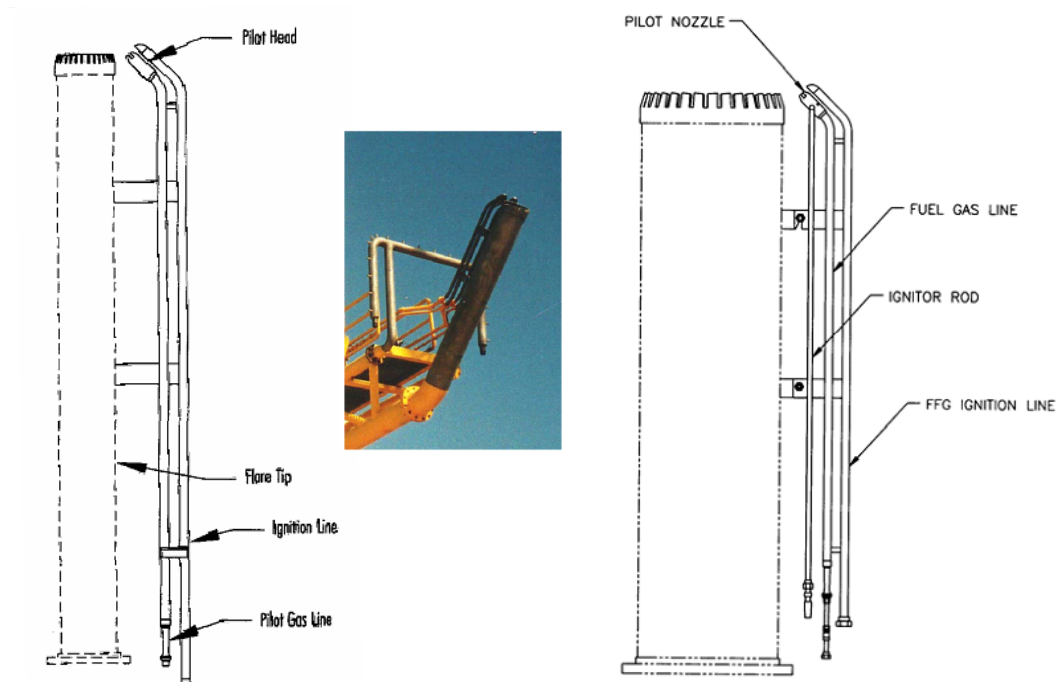
مشعل به عنوان مهمترین بخش فلر در طراحی آن شناخته می‌شود. دست یافتن به یک احتراق کامل با کمترین میزان آلاینده‌گی، جرقه زنی مطمئن، ایجاد یک شعله پایدار و کم صدا (و نه لزوماً بدون دود) و ... از پارامترهایی است که در طراحی یک مشعل مناسب باید به آنها توجه داشت.

## ۲-۲-۷ پیلوت مشعل (Pilot Burner)

برای بر خورداری از یک شعله پیوسته و مناسب نیاز به یک پیلوت جهت جرقه‌زنی است. این پیلوت‌ها عموماً در اطراف نوک فلر کار گذاشته می‌شوند و به صورت دستی و یا خودکار فعال می‌گردند. پیلوت‌های خودکار عموماً توسط یک ابزار تشخیص شعله کار می‌کنند، که در آنها از یک ترموکوپل و یا سنسور مادون قرمز (و در موارد خاص همچون فلرهای زمینی، سنسور ماورا بنفش) استفاده شده است. نمونه‌ای از پیلوت مشعل در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



شکل ۲-۴. نمونه های از پیلوت مشعل [۹،۱۴]

### ۲-۲-۸ جت های بخار (Steam Jets)

شعله های پخشی هوای خود را از محیط اطراف خود تامین می کنند، اما در دبی های سوخت بالا در یک فلر، هوای بیشتری با سرعتی بالاتر برای احتراق مورد نیاز است. برای این منظور نازل های سرعت بالای بخار آب در اطراف نوک فلر کار گذاشته می شوند که با افزایش آشفته گی جریان و تامین هوای مورد نیاز باعث افزایش راندمان احتراق می گردند. (شکل ۲-۷) در فلرهای با ظرفیت بالا، تزریق بخار از مرکز نوک فلر انجام می شود. علاوه بر افزایش آشفته گی و تامین هوا، نازل های بخار آب باعث کاهش تشکیل دود در شعله می شوند. سه تئوری در توجیه اثر تزریق بخار بر کاهش دودزایی شعله وجود دارد.

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



- تزریق بخار باعث جدا شدن مولکولهای هیدروکربن شده و پلیمریزاسیون را به کمترین حد خود می‌رساند و بدین ترتیب ترکیباتی از اکسیژن تولید می‌کند که با سرعت کمتر و در دمای پایین‌تری در احتراق شرکت می‌کنند.
- تزریق بخار موجب کاهش دمای مرکز شعله شده و مانع از شکست حرارتی مولکولها (thermal cracking) می‌شود.
- تزریق بخار باعث تبدیل ذرات کربن به CO، CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub> شده که همین امر از سرد شدن ذرات کربن و تشکیل دوده جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، تزریق بخار در تبدیل CO (به عنوان یک آلاینده و محصول احتراق نامطلوب) به CO<sub>2</sub> موثر است.



شکل ۲-۷. استفاده از نازل های تزریق بخار در فلر برای بهبود راندمان احتراق

حد تزریق بخار آب در یک فلر، ظرفیت بدون دود (smokeless capacity) آن را تعیین می‌کند. منظور از ظرفیت بدون دود در یک فلر، حجمی از گاز است که می‌توان در فلر بدون تولید دود سوزاند. برای بهینه سازی میزان تزریق آب از سنسورهای مادون قرمز استفاده می‌شود. این سنسورها خواص شعله را تشخیص داده و بر اساس آن دبی بخار را بصورت خودکار تنظیم می‌نمایند. از معایب تزریق بخار می‌توان به افزایش صدای احتراق و همچنین افزایش هزینه‌ها اشاره نمود.

### ۹-۲-۲ تجهیزات کنترلی

این تجهیزات کنترل فرایند جرعه زنی، تزریق بخار و دبی گاز فلر را بر عهده دارند و در دو نوع دستی و خودکار به کار می‌روند. مصرف سوخت در فلر را می‌توان با اندازه‌گیری مداوم دبی و ظرفیت حرارتی (Btu/scf) گاز خروجی، به کمترین حد خود رساند و به صورت خودکار، مقدار سوخت کمکی را به نحوی تنظیم نمود تا همواره مقدار حداقل ۳۰۰ Btu/scf برای فلرهای همراه با تزریق بخار فراهم باشد. میزان تزریق بخار نیز با کنترل دبی گاز خروجی قابل تنظیم می‌باشد. همچنین می‌توان از سنسورهای تشخیص دود برای این امر استفاده نمود. کنترلرهای سیستم جرعه زنی می‌توانند توقف احتراق را تشخیص داده و با جرعه زدن مجدد مانع از قطع فرآیند فلرینگ شوند.

### ۳-۲ نحوه عملکرد فلر

مراحل کار یک سیستم فلرینگ خودکار را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- فرستادن سیگنال برای شروع فلرینگ
- شروع سیکل پاکسازی (purging) فلر
- جرعه زنی پیلوت
- ورود گاز به فلر
- کنترل فرایند فلرینگ و دما
- حالت توقف کار (shutdown)
- حالت توقف کار اضطراری: در مواردی همچون برگشت شعله نیاز است که سیستم متوقف شود.



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

## ۴-۲ انواع فلر

فلرها بر اساس موضوعات مختلفی از قبیل ارتفاع نصب، نحوه اختلاط در نوک فلر، نوع کاربری و ... به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند که در زیر به آنها اشاره می‌شود.

### ۴-۲-۱ طبقه‌بندی بر اساس شکل ظاهری و ارتفاع نصب نوک فلر

#### ۴-۲-۱-۱ فلرهای هوایی (Elevated Flares)

فلرهای هوایی (شکل ۲-۸) متداولترین نوع فلر در صنایع پتروشیمی و پالایشگاهها بوده و از ظرفیت بیشتری نسبت به فلرهای زمینی برخوردار هستند. در این فلرها گازهای زائد توسط یک دودکش بلند که ارتفاع آن از ۳۲ فوت تا بیش از ۳۲۰ فوت می‌باشد، به نوک فلر منتقل شده و در آنجا سوزانده می‌شوند [۸]. فلرهای هوایی می‌توانند از نوع هواکمک، بخارآب‌کمک و یا ساده باشند. چنانچه این فلرها به اندازه کافی بلند باشند، به خوبی می‌توانند گازهای سمی و بدبو را بدون هیچگونه آسیبی پخش نمایند. این فلرها هزینه اولیه بالایی دارند و امکان دسترسی به تجهیزات آنها بسیار دشوار می‌باشد. همانطور که در بخش ۴-۲-۱ آورده شد، پایداری استاتیکی این دسته از فلرها (بعلت ارتفاع بسیار زیاد) به سه طریق تامین می‌شود، بر این اساس فلر یا از نوع خود مهار و یا در یک بوده و یا با استفاده از کابل مهار می‌شود.

#### ۴-۲-۱-۲ فلرهای زمینی (Ground Flares)

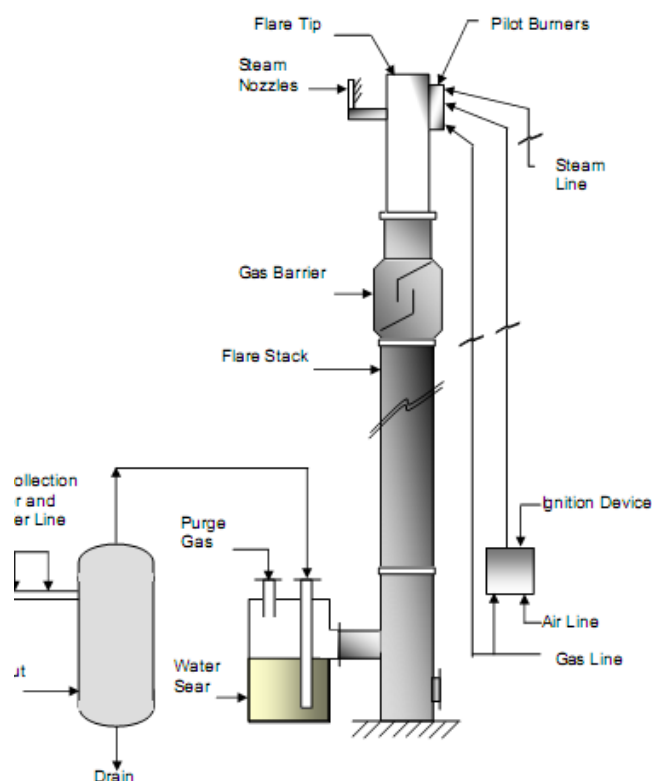
در فلرهای زمینی (شکل ۲-۹) فرآیند احتراق در سطح زمین، و نه در ارتفاع، انجام می‌گیرد. در مقایسه با فلرهای هوایی، در این فلرها احتراق بدون دود به راحتی و بدون مشکلاتی از قبیل افزایش صدا و یا صدمات ناشی از تشعشع، امکان پذیر می‌باشد. اما نقص عمده این نوع فلرها پخش محصولات احتراق است، که در سطح زمین انجام می‌گیرد و باعث آلودگی شدید محیط زیست می‌شود، به ویژه اگر محصولات احتراق گازهای سمی باشند. علاوه بر این قرار گرفتن سیستم جرقه‌زنی و شعله

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



ایجاد شده در کنار سایر تجهیزات ممکن است باعث وقوع انفجار و آتش سوزی گردد. هزینه راه اندازی، عملکرد و نگهداری از این نوع فلرها نیز بسیار بالا است که همین موضوع استفاده از این نوع فلرها را محدود به کاربردهای خاص کرده است. فلرهای زمینی با ظرفیت بالا عموماً به شکل واحدهای مستطیلی ساخته می‌شوند و برای ظرفیت های کم از واحدهای استوانه‌ای شکل استفاده می‌گردد [۸]. در شکل ۲-۹-۱ الف دو نمونه از فلرهای زمینی مستطیل شکل آورده شده است. در شکل ۲-۹-۲ ب نمایی از داخل این فلرها ارائه شده است. در فلر نمایش داده شده از تزریق بخار آب برای بهبود احتراق استفاده شده است. همچنین دیواره های سرامیکی آن که نقش عایق حرارتی را ایفا می‌کنند و پیلوت‌ها که در مجاورت مشعل‌ها قرار گرفته اند، به خوبی در شکل قابل مشاهده است.



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

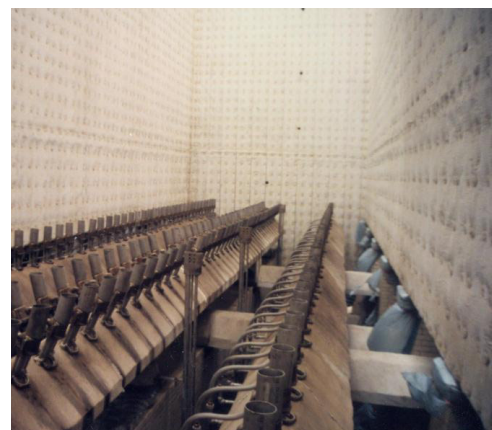
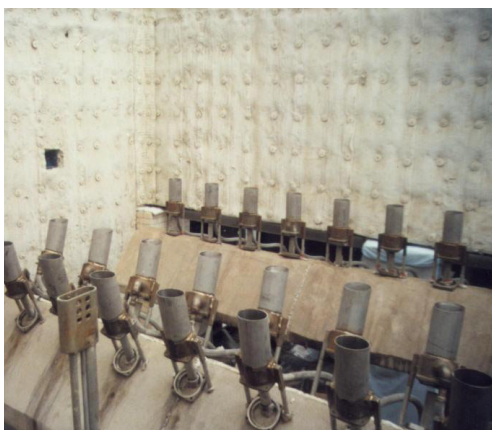
عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



شکل ۲-۸. نمونه ای از یک فلر هوایی



الف) فلرهای زمینی مستطیلی



ب) نمای داخلی فلرهای شکل الف

شکل ۲-۹. نمونه ای از یک فلر زمینی

۲-۴-۱-۳ فلرهای شبکه‌ای (Grade level and Elevated Staged Matrix

Flares)

از این فلرها برای سوزاندن بدون دود گازهای زائد در ظرفیت های بسیار بالا

استفاده می شود. به کار بردن شبکه‌ای از مشعلها که در فشارهای بالا کار می کنند و آشفستگی

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد



عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

بالایی نیز دارند، باعث می شود احتراق در این دسته از فلرها بدون دود صورت گیرد. در قسمت چپ شکل ۲-۱۰- الف یک گرید فلر با ظرفیتی بالغ بر  $3/000/000 \text{ lb/h}$  نشان داده شده است که دارای حدوداً ۶۰۰ مشعل بوده و در ۷ ردیف قرار گرفته اند.



الف) نمونه‌ای از Grade level Flares



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



ب) نمونه‌ای از یک Elevated Staged Matrix Flare

شکل ۲-۱۰. نمونه‌هایی از فلرهای شبکه‌ای

#### ۲-۴-۲ طبقه‌بندی بر اساس نحوه اختلاط در نوک فلر

احتراق در اغلب فلرها از نوع پخش می‌باشد. منظور از احتراق پخشی (diffusion flame) احتراقی است که در آن هوای مورد نیاز، از محیط اطراف مشعل تامین می‌گردد. در شعله‌های پخش بزرگ، گاهی ممکن است با کمبود اکسیژن مواجه شویم که منجر به احتراق ناقص و در نتیجه تولید دوده می‌شود. برای جلوگیری از این موضوع، روش‌های مختلفی برای تامین هوای مورد نیاز برای احتراق و اختلاط مناسب مخلوط سوخت و هوا ارائه شده است. در زیر به انواع مختلف فلرها، بر اساس مکانیزم اختلاط و تامین هوای احتراق، اشاره می‌گردد.

#### ۲-۴-۲-۱ فلرهای بخارکمک (Steam-Assisted Flares)

فلرهای بخارکمک عموماً برای فلرینگ گازهای زائد سنگین که تمایل زیادی به دودزایی داشته، و در محل‌هایی که به بخار آب فشار بالا دسترسی دارند، مانند صنایع پتروشیمی و پالایشگاههای نفت‌خام به کار می‌روند. احتراق در فلرهای بخارکمک از نوع پخشی (diffusion) می‌باشد. در این

دسته از فلرها، برای تامین هوای مورد نیاز برای احتراق و همچنین بهبود فرایند اختلاط و جلوگیری از احتراق ناقص، بخارآب به منطقه‌ی احتراق پاشش می‌شود. این پاشش می‌تواند از اطراف و یا از مرکز نوک فلر صورت گیرد. در شکل ۲-۱۱ نمونه‌ای از یک نوک فلر نمایش داده شده است که می‌توان نازل‌های پاشش بخار را در حلقه‌ای که در اطراف نوک فلر قرار گرفته است، مشاهده نمود [۱۱]. این مدل برای استفاده در پالایشگاهها طراحی شده است و با توجه به این کاربری، پارامترهایی همچون راندمان و ظرفیت بدون دود بالا و ایجاد صدای بسیار کم در طراحی آن لحاظ نشده است.

در شکل ۲-۱۲ یک نوک فلر بدون دود با عملکرد بسیار بالا، در هنگام تولید نشان داده شده است. در این نوع فلرها نحوه‌ی تزریق بخار کاملاً متفاوت با مدل قبلی است، بدین ترتیب که نازل‌های Floanda در یک کلاهک مخروطی شکل در قسمت فوقانی نوک فلر قرار می‌گیرند. بخار، حجم بالایی از هوا را از طریق نازل‌های Floanda (تقریباً با نسبت وزنی ۴ به ۱) به داخل می‌کشد. در قسمت بالایی مخروط، هوا، بخار و گازهای زائد، پیش از جرقه‌زنی توسط پیلوت، به خوبی با هم مخلوط می‌گردند.



شکل ۲-۱۱. نمونه از یک فلر بدون دود بخار کمک برای ظرفیت های پایین

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

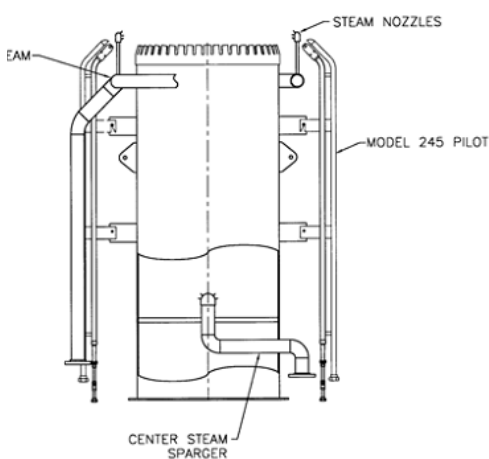


شکل ۲-۱۲. نمونه از یک فلر بدون دود بخار کمک برای ظرفیت های بالا

از فلرهای هواکمک عموماً در ظرفیت‌های بدون دود بالا استفاده می‌شود. نازل‌های به کاررفته در این دسته از فلرها بسیار کم صدا نیز می‌باشند (میزان صدای تولیدی در این دسته از فلرها چیزی در حدود  $12-14\text{dB}$  کمتر از مدل اول می‌باشد). از کاربرد عمده این دسته می‌توان به صنایع تولید اولفین و دیگر محصولات شیمیایی اشاره نمود که در آنها بطور مداوم به فلرینگ هیدروکربن‌های غیر اشباع نیاز است. به طور خلاصه می‌توان مزایای فلرهای بخارکمک را به شرح صفحه زیر بیان نمود:

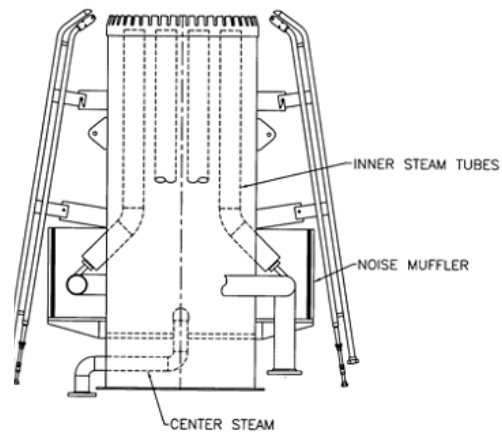
- هزینه نگهداری پایین
  - ظرفیت بدون دود بالا به علت تزریق بخار
  - احتراق پایدار و مطمئن به خاطر وجود حلقه‌ی نگهدارنده شعله
  - جریان جرمی بدون دود بالا
  - عمر بالای نوک فلر به علت اثر خنک‌کنندگی بخار آب
- از نکاتی که باید در طراحی این فلرها به آن توجه ویژه شود می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
- جریان با فشار بالای بخار باید موجود باشد.

- رینگها، نازلها، لولهها و بطور کلی تمامی تجهیزاتی که در سیستم پاشش بخار استفاده شدهاند، باید از آلیاژهای بسیار مقاوم در برابر حرارت ساخته شوند تا از صدمه دیدن آنها در حین فلرینگ جلوگیری شود.
  - باید از یک حلقه محافظ شعله به منظور پایدارسازی احتراق استفاده نمود.
  - استفاده از صدا خفه کنهایی که در خارج از نوک فلر قرار میگیرند، برای کاهش میزان صدا بسیار مفید میباشند.
- در شکل ۲-۱۳ شماتیکی از فلرهای بخارکمک که در آنها بخار به صورت خارجی و یا از داخل تزریق می گردد، نشان داده شده است. مشخصات فنی این فلرها در جدول ۲-۱ آورده شده است.



INTERNAL STEAM ASSISTED FLARE TIP  
SA MODEL

ب) پاشش بخار از خارج



NATURAL STEAM ASSISTED FLARE TIP  
SAI MODEL

الف) پاشش بخار از داخل

شکل ۲-۱۳. شماتیکی از فلرهای بخارکمک [۱۲]



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

جدول ۲-۱. مشخصات فنی فلرهای بخارکمک شکل ۲-۶

ابعاد	طول قطر	۱۰ فوت (۳ متر) ۸۴ - ۴ اینچ (۲/۱۳ - ۰/۱ متر)
جنس مواد	قسمت فوقانی	فولاد زنگ نزن ۳۰۴، ۳۱۶، ۳۱۰
	قسمت پایینی	فولاد کربنی
	حلقه محافظ شعله	فولاد زنگ نزن ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۱۰
	آببند دینامیکی	فولاد زنگ نزن ۳۰۴
	حلقه تزریق بخار	فولاد زنگ نزن ۳۲۱
	رطوبت زن (sparger) مرکزی	فولاد زنگ نزن ۳۲۱
	لوله داخلی تزریق بخار	فولاد زنگ نزن ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۱۰

#### ۲-۲-۴-۲ فلرهای هواکمک (Air-Assisted Flares)

فلرهای هواکمک (شکل ۲-۱۴) برای فلرینگ گازهای زائد سنگین و در مواقعی که دسترسی به جریان بخار فشار بالا نمی‌باشد، استفاده می‌شود. این فلرها به ویژه در صنایع پتروشیمی، کارخانجات تولید محصولات شیمیایی، خطوط انتقال و مراکز تولید گاز طبیعی کاربرد دارند. این فلرها از دو لوله (riser) هم مرکز و یک یا چند فن تشکیل شده است. هوای مورد نیاز برای احتراق توسط فنهای فشار پایینی که در پایه‌ی دودکش فلر قرار گرفته‌اند تامین و از فضای حلقوی بین لوله انتقال گازهای زائد و کانال خارجی هوا به نوک فلر انتقال داده می‌شود. لوله خارجی هوا همچنین نقش مهار کننده‌ی استاتیکی را برای دودکش فلر ایفا می‌کند.

دمیدن هوا سه اثر مهم بر فرایند فلرینگ دارد:

- دمیدن با فشار هوا به داخل گازهای زائد باعث افزایش آشفستگی جریان و در نتیجه بهبود فرایند اختلاط و افزایش راندمان احتراق می‌گردد.
- دمیدن هوای اضافی، از احتراق ناقص و در نتیجه تولید دود جلوگیری می‌کند.
- دمیدن پیوسته‌ی هوا موجب خنک کردن نوک فلر و در نتیجه بالا رفتن عمر آن می‌شود.

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



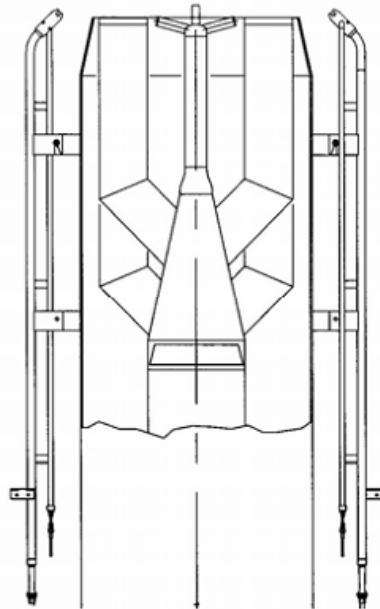
شکل ۲-۱۴. نمایی از فلرهای هواکمک

از مزایای عمده این فلرها می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- این نوع فلرها به علت اختلاط بسیار مناسب، به شدت بدون دود می باشند.
- قابلیت فلرینگ بدون دود هیدروکربن های سنگین را دارند.
- طول عمر بالایی دارند.
- در عین کارکرد بدون دود، هزینه کارکرد پایینی دارند.
- میزان تشعشع پایین تری را نسبت به سایر انواع دارد.
- نیاز به سیستم کنترلی پیشرفته ای ندارند.
- احتراق در این نوع فلرها بسیار پایدار و قابل اطمینان می باشد.

در شکل ۲-۱۵ شماتیکی از ساختار یک فلر هوا کمک نشان داده شده است و مشخصات فنی آن در

جدول ۲-۲ ارائه گردیده است.



شکل ۲-۱۵. شماتیکی از یک فلر هوا کمک (مدل Environ)

جدول ۲-۲. مشخصات فنی فلرهای هوا کمک شکل ۲-۸

ابعاد	طول قطر	۶ فوت (۱/۸ متر) ۸۴ - ۴ اینچ (۲/۱۲ - ۰/۱ متر)
جنس مواد	بدنه نوک فلر آببند دینامیکی	فولاد زنگ نزن ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۱۰ فولاد زنگ نزن ۳۰۴
مدلهای موجود کارخانه Flares	MAVP SFVP Environ	برای گازهای فشار بالا برای گازهای فشار پایین برای ظرفیت های بالا

۲-۴-۲-۳ فلرهای فشارکمک (Pressure-Assisted Flares)



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

در این فلرها از فشار جریان گازهای زائد برای بهبود فرایند اختلاط استفاده می شود. البته شرط استفاده از این فلرها این است که فشار جریان گاز خروجی به اندازه کافی بالا باشد. در این دسته از فلرها، مشعلها عموماً بر روی سطح زمین قرار می گیرند. بهمین علت این گونه فلرها نیاز به فضای کافی و مناسب برای نصب مشعل دارند. از آنجا که استفاده از این فلرها بسیار محدود می باشد در این گزارش، از شرح بیشتر آن خودداری می شود.

#### ۲-۴-۲-۴ فلرهای بدون کمک (معمولی) (Non-Assisted Flares)

در این فلرها از هیچگونه تجهیزات کمکی برای بهبود فرایند اختلاط استفاده نمی شود. لذا کاربرد این دسته بسیار کم و محدود به مواردی است که در آن ظرفیت حرارتی و نسبت کربن به هیدروژن گازهای زائد پایین بوده و در نتیجه به خودی خود احتراقی کم دودی را به همراه دارند. در این فلرها دمای احتراق پایین می باشد که همین امر واکنش های شکست (cracking) را به کمترین حد خود می رساند.

#### ۲-۴-۲-۳ طبقه بندی بر اساس موقعیت قرارگیری مشعلها

#### ۲-۴-۲-۱ فلرهای باز (Open Flares)

از این فلرها در مواردی استفاده می شود که هزینه نصب و نگهداری از اهمیت بالاتری نسبت به پارامترهایی همچون میزان تولید صدا، تابش و نمایان بودن شعله برخوردار باشد. این فلرها از نوع فلرهای هوایی می باشند که ارتفاع آنها با توجه به میزان تابش شعله مشخص می شود. (میزان تابش مجاز معمولاً در حدود  $1500 \text{ Btu/hr.ft}^2$  می باشد).

#### ۲-۴-۲-۲ فلرهای زمینی بسته (Enclosed Ground Flares)

در این دسته از فلرها (شکل ۲-۱۶) مشعلها درون یک پوسته که از داخل عایق شده است، قرار می گیرند. به این ترتیب شعله در این مدل کاملاً در داخل محفظه احتراق مخفی خواهد بود. این پوسته از شدت صدا، تابش و انتقال حرارت تشعشعی کاسته و نقش یک محافظ را در برابر جریان باد دارد.



اختلاط مناسب در این فلرها (به منظور دستیابی به یک احتراق بدون دود)، اغلب از طریق افت فشار بالا در نازلها تامین می شود و دیگر نیازی به تزریق بخار یا هوا نمی باشد. می توان این فلرها را در دسته‌ی فلرهای فشارکمک یا معمولی طبقه‌بندی نمود. این فلرها همواره بر روی زمین نصب می‌گردند، ظرفیتی پایین‌تر نسبت به فلرهای باز دارند و برای احتراق جریان‌های جرمی ثابت و پیوسته‌ی گازهای زائد به کار می‌روند. در این دسته از فلرها می توان به ازای ظرفیت‌های حرارتی پایین‌تری نسبت به نوع باز، به یک احتراق پایدار دست یافت. ( $50$  تا  $60$  Btu/scf) که دلیل آن را می‌توان وجود پوسته بر روی مشعلها و محافظت در برابر باد دانست [۱۵].



شکل ۲-۱۶. نمونه ای از یک فلر بسته زمینی (Enclosed Ground Flare) [۱۷]

کاربرد عمده این فلرها در لندفیلدهای بیوگاز می باشد. از دیگر کاربردهای آن می توان به پالایشگاهها، کارخانجات تولید مواد شیمیایی، ایستگاههای کمپرسور و ... اشاره نمود. این فلرها به علت فرایند کنترل ساده، هزینه پایینی دارند. از دیگر مزایای آنها می توان به موارد زیر اشاره نمود:



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

- پنهان بودن شعله به علت قرار گرفتن مشعلها در داخل یک پوسته
  - میزان تولید صدای بسیار پایین
  - انتقال حرارت تابشی پایین به علت استفاده از عایقهای سرامیکی
  - امکان راحت نمونه‌گیری و آزمایش آلاینده‌های حاصل از فلرینگ
- 
- عمر بالا
  - احتراق بدون دود و سطح پایین آلاینده‌های CO و NOX
  - ارتفاع پایین دودکش فلر
  - بر خورداری از ساختمانی چند قسمته که نصب و جابجایی آن را بسیار آسان می‌سازد.
- در شکل ۲-۱۷ شماتیکی از ساختمان یک فلر بسته زمینی نشان داده شده است. طول این فلرها بین ۲۰ تا ۸۰ فوت (۶/۱ تا ۲۴/۲ متر) بوده و قطری معادل ۲۴۰ - ۳۶ اینچ (۱/۶ - ۰/۹۱ متر) دارند.
- مشعل‌های به کار رفته در فلرهای بسته از پیشرفته‌ترین انواع مشعلهای موجود در بازار بوده که دارای عمر بالا و سطح آلایندگی پایین می‌باشند. دودکش این فلرها دارای عایقی به ضخامت ۲ تا ۳ اینچ می‌باشد و ارتفاع آن با توجه به دبی گازهای زائد تعیین می‌گردد.
- مشخصات فنی نمونه ای از فلرهای زمینی بسته در جدول ۲-۳ آورده شده است.

#### ۲-۳-۳-۲ فلرهای نیمه‌بسته (Semi-Enclosed Candlestick Flares)

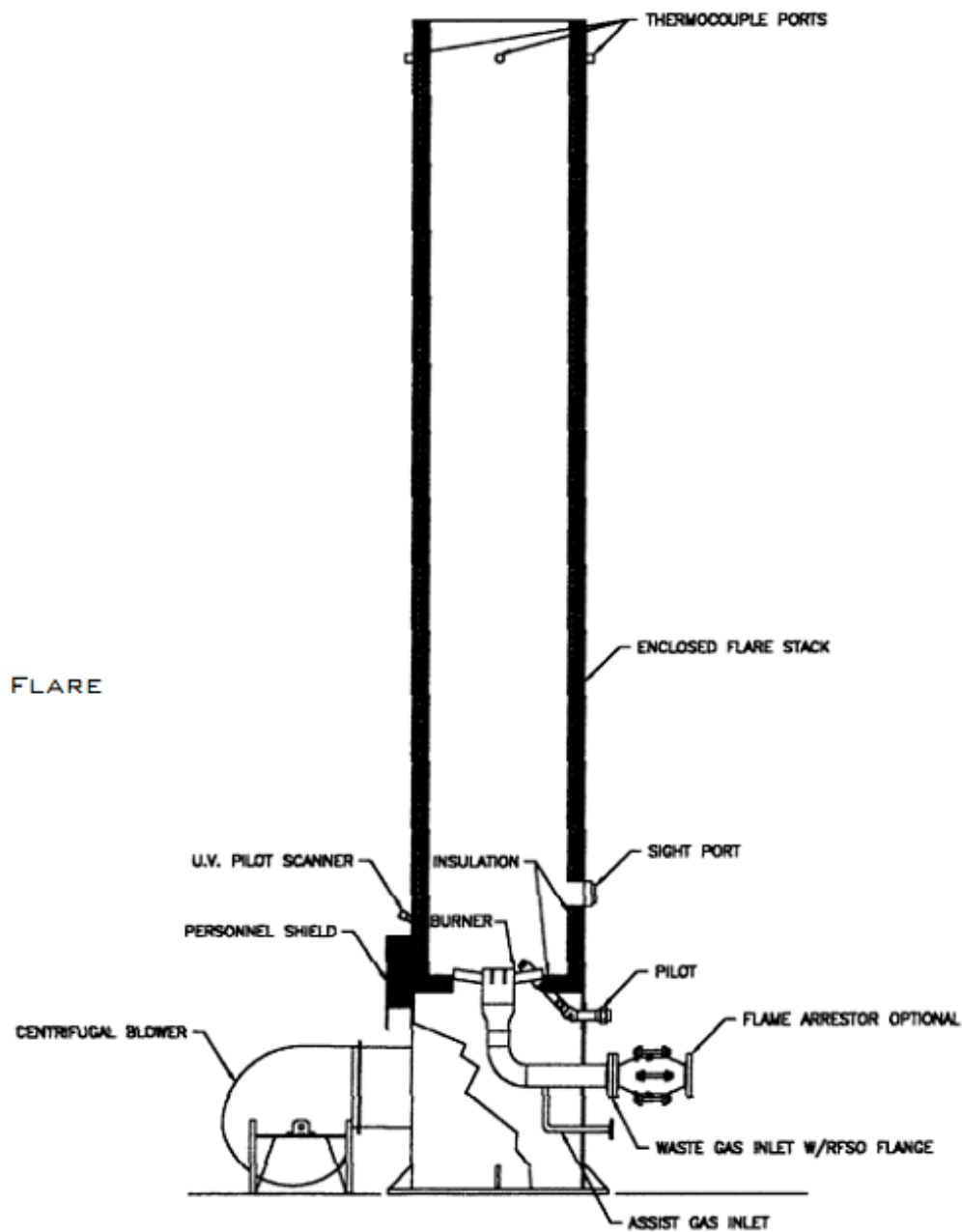
فلرهای نیمه بسته از نوع فلرهای هوایی (Elevated flare) می‌باشند که در آن برای کمتر نمایان بودن شعله‌ی حاصل از فلرینگ، از یک پوسته به دور نوک فلر استفاده شده است. این پوسته همچنین، باعث کاهش شدت تابش می‌شود. مشعل این گونه فلرها از فولادهای آلیاژی که مقاومت زیادی در برابر دماهای بالا دارند ساخته می‌شود تا از هرگونه خوردگی و تغییر شکل ناشی از حرارت بالا

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد



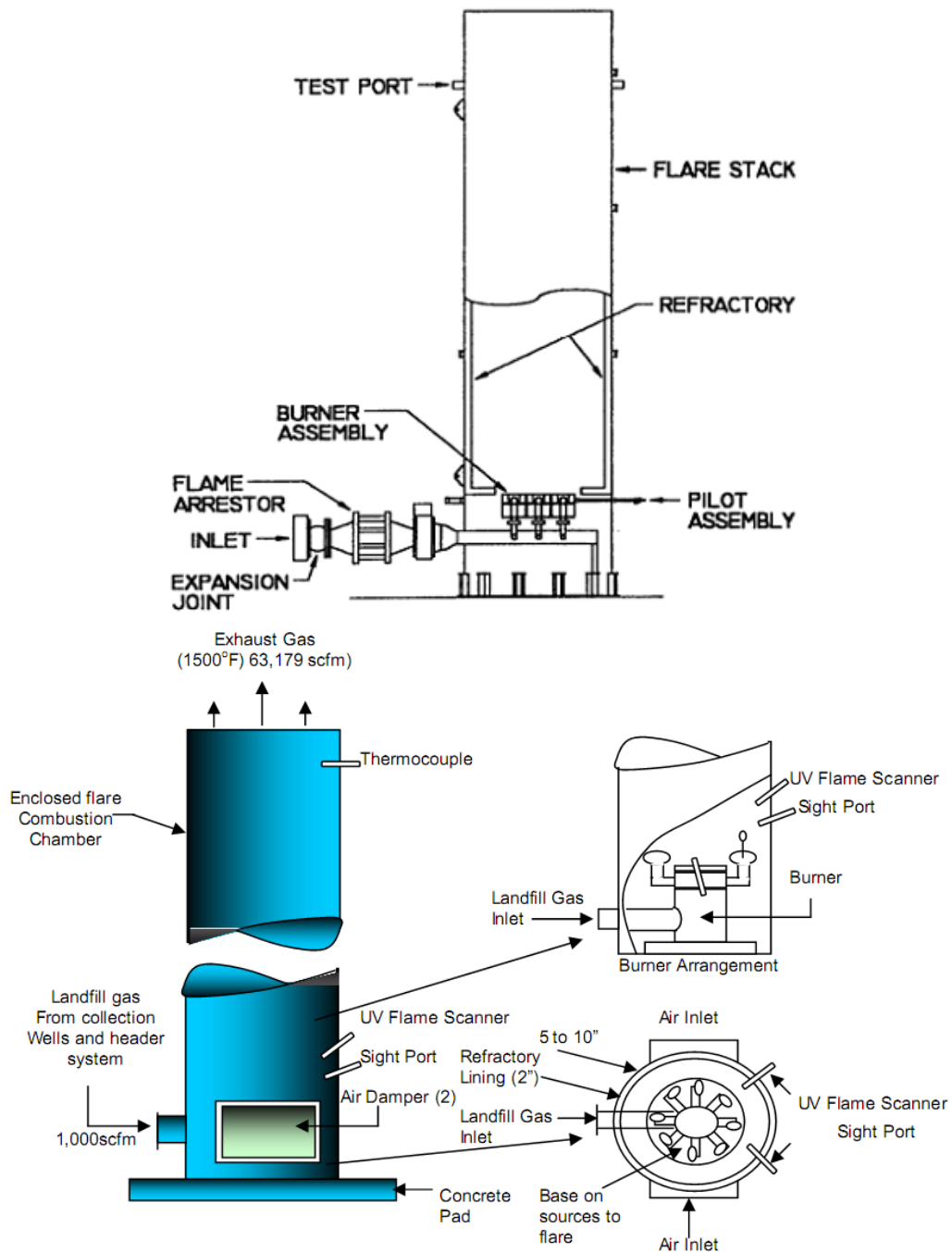
عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

جلوگیری شود. کاربرد عمده این دسته از فلرها در لندفیلدها و تالابهای بی هوای است. در شکل ۲-۱۸ نمونه ای از فلرهای نیمه بسته نمایش داده شده و مشخصات فنی آن در جدول ۲-۴ آورده شده است.



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



شکل ۲-۱۷. شماتیکی از یک فلر زمینی بسته



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

جدول ۲-۳. مشخصات فنی نمونه ای فلرهای زمینی بسته [۱۰]

جنس مشعل	فولاد زنگ نزن				
جنس پیلوت	فولاد زنگ نزن				
جنس دودکش	فولاد کربنی				
نوع اتصالات بکار رفته	فلنج ANSI #150				
دمای کارکرد	۱۵۰۰ درجه فارنهایت				
میزان NO <sub>x</sub> تولیدی	کمتر از ۰/۰۲۵ #s/MMBtu's/hr				
میزان CO تولیدی	کمتر از ۰/۰۶ #s/MMBtu's/hr				
آلاینده‌گی و شعله نمایان	ندارد				
راندمان احتراق	بیش از ۹۹ درصد				
<b>MODEL</b>	<b>INLET SIZE IN (MM)</b>	<b>MAX HEAT RELEASE MMBTU/HR (MMKCAL/HR)</b>	<b>FLOW RATE SCFM (M<sup>3</sup>/HR)</b>	<b>TURN DOWN RATIO</b>	<b>RETENTION TIME SEC. (MIN)</b>
FEF-2	3 (76)	2.5 (0.63)	75 (127)	8 : 1	0.6
FEF-5	4 (101)	5.0 (1.26)	160 (272)	8 : 1	0.6
FEF-10	6 (152)	10.0 (2.52)	320 (543)	8 : 1	0.6
FEF-18	8 (203)	18.0 (4.54)	650 (1,104)	8 : 1	0.6
FEF-21	10 (254)	21.0 (5.3)	1,000 (1,698)	8 : 1	0.6
FEF-58	12 (305)	58.0 (14.6)	2,000 (3,396)	8 : 1	0.6
FEF-110	14 (355)	110.0 (27.7)	4,500 (7,641)	8 : 1	0.6
FEF-175	16 (406)	175.0 (44.1)	6,000 (10,200)	8 : 1	0.6

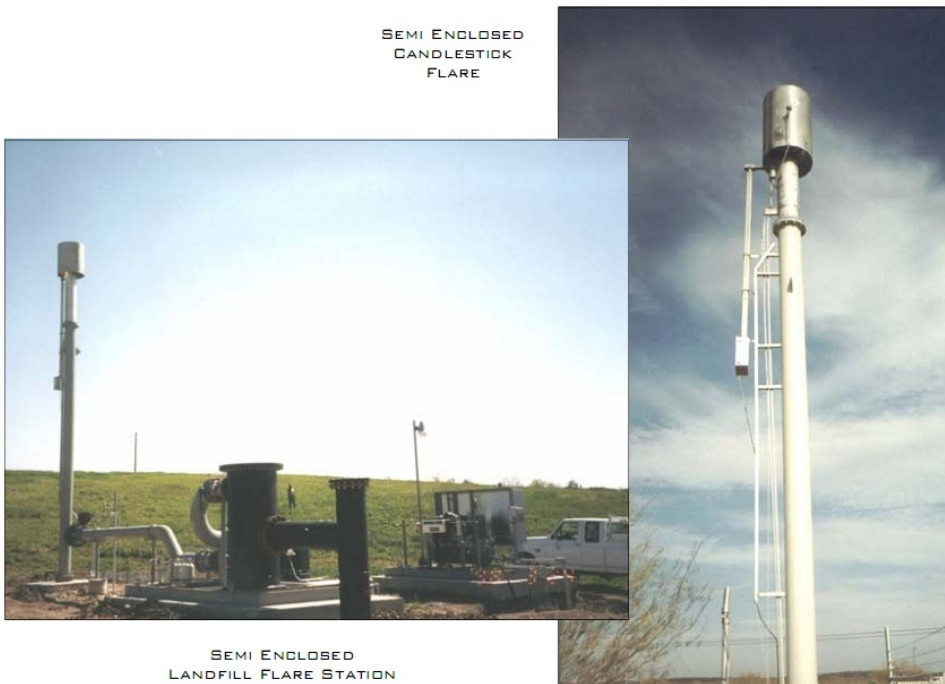
۲-۴-۴ طبقه‌بندی بر اساس نوع کاربرد خاص

۲-۴-۴-۱ فلرهای صوتی (Sonic Flares)

این نوع از فلرها (شکل ۲-۱۹) برای جلوگیری از تولید دود، با سرعت صوت کار می‌کنند. بهمین منظور در آنها از نازل‌هایی که دارای چند خروجی هستند استفاده می‌شود تا بدین طریق جریان فشار بالایی از گازهای زائد را آماده فلرینگ نمایند [۱۶].

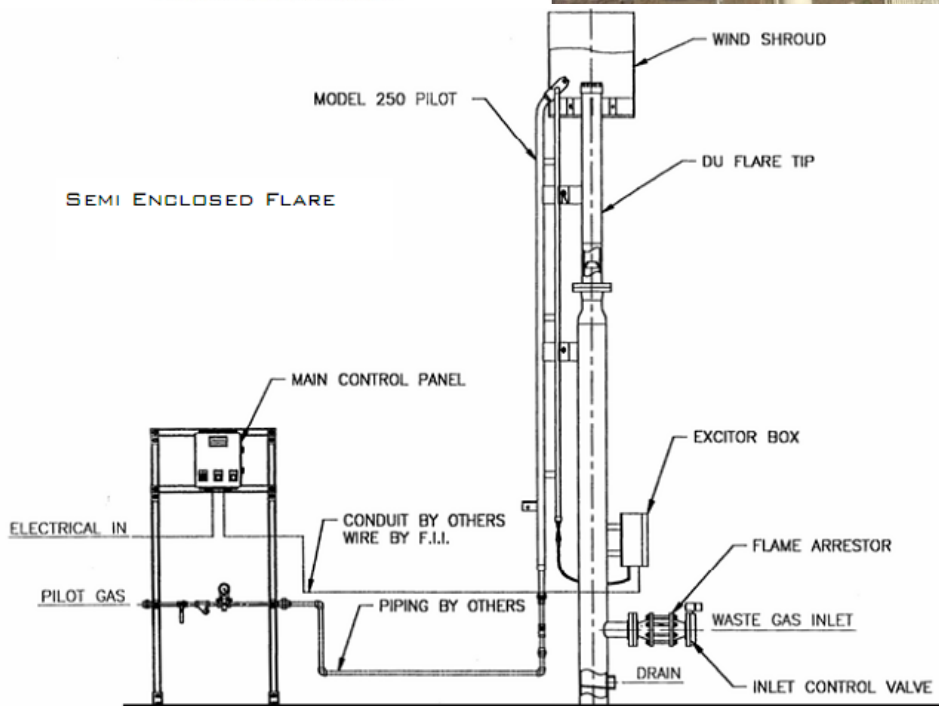
عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



SEMI ENCLOSED  
CANDLESTICK  
FLARE

SEMI ENCLOSED  
LANDFILL FLARE STATION



شکل ۲-۱۸. نمونه ای از فلرهای نیمه بسته (semi enclosed flares)



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

جدول ۲-۴. مشخصات فنی نمونه ای از فلرهای نیمه بسته

جنس مشعل ها	فولاد زنگ نزن			
جنس پوسته	فولاد زنگ نزن			
جنس دودکش	فولاد کربنی			
اتصالات بکاررفته	فلنج ANSI 150 lb			
سیستم الکتریکی	VAC ۲۲۰ / ۱۱۰			
<b>MODEL</b>	<b>MAX FLOW SGFH (M3/HR)</b>	<b>HEIGHT FT. (M)</b>	<b>DIAMETER IN. (MM)</b>	<b>SHROUD DIA. IN. (MM)</b>
<b>SEF-2</b>	4,000 (113)	10 (3)	2 (51)	8 (203)
<b>SEF-3</b>	9,000 (255)	12 (36)	3 (76)	18 (457)
<b>SEF-4</b>	16,000 (453)	12 (36)	4 (102)	24 (610)
<b>SEF-6</b>	36,000 (1019)	12 (36)	6 (152)	24 (610)
<b>SEF-8</b>	64,000 (1811)	16 (48)	8 (203)	30 (762)
<b>SEF-10</b>	100,000 (2830)	20 (61)	10 (254)	36 (914)
<b>SEF-12</b>	155,000 (4386)	20 (61)	12 (305)	36 (914)

این فشار بالا باعث افزایش آشفته‌گی و در نتیجه بهبود اختلاط شده و همچنین هوای اضافی جهت احتراق را فراهم می‌آورد. این نوع فلرها به ویژه در محل‌هایی که گازهای زائد با فشار بالا وجود دارد و همچنین محل‌هایی که نیاز به ظرفیت بدون دود بالاست، کاربرد دارند. از مزایای عمده‌ی فلرهای صوتی می‌توان به ظرفیت بدون دود بالا به علت سرعت بالای هوای ورودی و همچنین وجود نازل‌های چند خروجی، عمر بالاتر شرایط کارکرد معمولی و میزان پایین انتقال حرارت تابشی اشاره نمود. این فلرها عمدتاً در سکوها‌ی دریایی، خطوط انتقال، صنایع پتروشیمی، مراکز تولید و متراکم کردن گاز طبیعی، محل‌های دارای گازهای زائد فشار بالا و محل‌هایی که دسترسی به جریان بخار و یا هوای اضافی وجود ندارد، استفاده می‌شوند. شماتیک‌ی از این فلرها و مشخصات فنی آن به ترتیب در شکل ۲-۲ و جدول ۲-۵ آورده شده است.

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



شکل ۲-۱۹. نمایی از فلرهای صوتی (Sonic Flares)

#### ۲-۴-۴-۲ فلرهای تاسیساتی (Utility Flares)

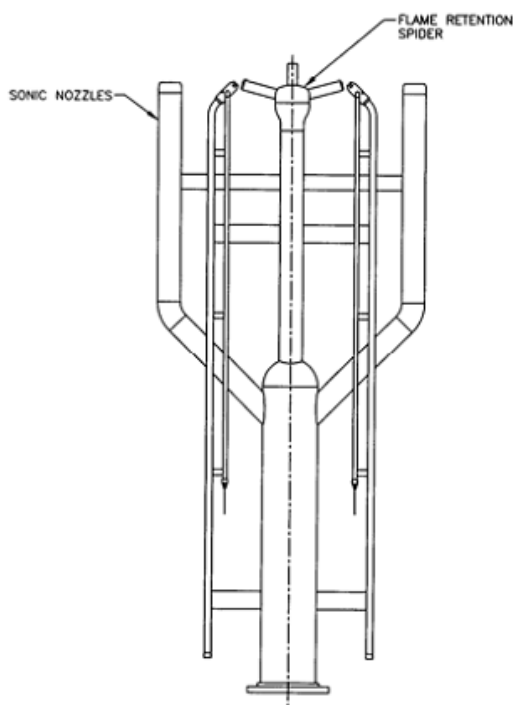
فلرهای تاسیساتی از پرکاربردترین و ابتداییترین انواع فلرها می‌باشند. از این فلرها در محل‌هایی استفاده می‌شود که در آنها دودزا بودن فرایند فلرینگ فاقد اهمیت بوده و یا فرایند فلرینگ به خودی خود و بدون نیاز به کمک خارجی (تزریق بخار و یا هوا) بدون دود انجام می‌گیرد. مزیت عمده این فلرها هزینه نصب و نگهداری پایین آنها می‌باشد. از این فلرها اغلب در پالایشگاهها، صنایع پتروشیمی، صنایع غذایی، صنایع تولید مواد شیمیایی، مراکز تولید و متراکم سازی گاز طبیعی و نیروگاههای بیوگاز استفاده می‌شود. شماتیکی از این فلرها و مشخصات فنی آن به ترتیب در شکل ۲-۲۱ و جدول ۲-۶ آورده شده است.



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد



عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



شکل ۲-۲۰. شماتیکی از نوک فلر یک نمونه فلر صوتی

جدول ۲-۵. مشخصات فنی فلر نمونه ای از یک فلر صوتی [۱۳]

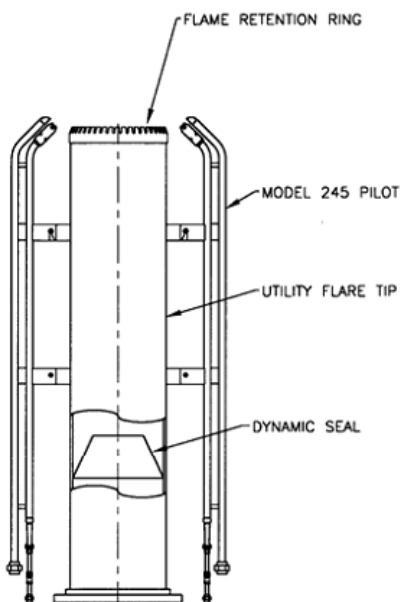
طول	۱۰ فوت (۳ متر)
قطر	۸۴ - ۴ اینچ (۲/۱۳ - ۰/۱ متر)
جنس قسمت فوقانی	فولاد زنگ نزن ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۱۰
جنس بازوها	فولاد زنگ نزن ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۱۰
جنس قسمت پایین	فولاد کربنی

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن



شکل ۲-۲۱ الف. نمونه ای از فلرهای تاسیساتی



شکل ۲-۲۲ ب. نوک فلر یک نمونه فلر تاسیساتی



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: آشنایی با فلر و انواع آن

جدول ۲-۶. مشخصات فنی فلر نمونه ای از یک فلر صوتی

طول	۱۰ فوت (۳ متر)
قطر	۸۴ - ۴ اینچ (۲/۱۳ - ۰/۱ متر)
جنس قسمت فوقانی	فولاد زنگ نزن ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۱۰
جنس قسمت پایین	فولاد کربنی
جنس حلقه محافظ شعله	فولاد زنگ نزن ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۱۰
آب بند دینامیکی	فولاد زنگ نزن ۳۰۴

## **فصل سوم:**

### **معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلوئنت**

### ۱-۳ مقدمه

برای حل مسایل جریان سیال توسط روش عددی (CFD) نرم افزارهای تجاری زیادی به وجود آمده است. نرم افزارهایی که در حال حاضر در بازار موجود است، ممکن است بسیار قوی باشند، اما عملکرد آنها هنوز نیازمند مهارت و درک بسیار از سوی کاربر می باشد، تا نتایج قابل قبولی در حالت های پیچیده به دست آید. در حال حاضر چهار نرم افزار FLOW3D، CD-STAR، PHOENICS و FLUENT توسط محققین مورد استفاده قرار می گیرد. اساس کار همه آنها روش حجم محدود می باشد و دقت این نرم افزارها توسط محققان زیادی مورد تأیید قرار گرفته است. در این میان نرم افزار FLUENT به علت دقت بالا و کاربری آسان، به شدت مورد توجه محققان و مهندسين قرار گرفته است، که در زیر مختصراً به معرفی آن می پردازیم. نرم افزار Fluent یکی از نرم افزارهای صنعتی مشهور می باشد که دارای قابلیت های فراوانی است. این نرم افزار قابلیت مدل سازی جریانهای دو و سه بعدی را داراست. برای استفاده از این نرم افزار ابتدا توسط یک نرم افزار کمکی مانند Gambit یا Mechanical Desktop هندسه جریان مشخص می گردد و عمل مش بندی نیز صورت می گیرد. نرم افزار Fluent از خروجی نرم افزار Gambit استفاده می نماید. این نرم افزار قابلیت انجام محاسبات با دقت معمولی و دقت مضاعف را دارد و به عنوان یک اختیار، کاربر می تواند هر کدام را انتخاب نماید.

### ۲-۳ مختصری درباره نرم افزار فلونت

این نرم افزار بر پایه روش حجم کنترل که یک روش بسیار قوی و مناسب در روش های دینامیک سیالات محاسباتی می باشد، بنا شده است. قابلیت های فراوانی نظیر مدل سازی جریانهای دائم و غیر دائم، جریان لزج و غیر لزج، احتراق، جریان مغشوش، حرکت ذرات جامد و قطرات مایع در یک فاز پیوسته و ده ها قابلیت دیگر Fluent را تبدیل به یک نرم افزار بسیار قوی و مشهور نموده است. آزمایشات عملی و محاسبات تئوری، دو روش اصلی و مشخص برای پیش بینی میزان انتقال حرارت

و چگونگی جریان سیال در کاربردهای مختلف صنعتی و تحقیقاتی می باشند. در اندازه گیریهای تجربی به دلیل هزینه های زیاد ترجیح داده می شود که آزمایشها بر روی مدلی با مقیاس کوچکتر از نسخه اصلی انجام پذیرد. حذف پیچیدگی ها و ساده سازی آزمایشها، خطای دستگاههای اندازه گیری و بعضی موانع در راه اندازه گیری از جمله مشکلاتی هستند که روشهای عملی با آنها رو به رو هستند و کارآیی این حالتها را در بعضی موارد مورد سوال قرار می دهند. مهمترین امتیاز محاسبات تئوری در مقایسه با آزمایشهای تجربی، هزینه کم آن است. گرچه در بسیاری موارد ترجیح داده می شود با استفاده از روشهای محاسباتی، آنالیز جریان و انتقال حرارت صورت گیرد ولی تایید تحلیلهای عددی نیاز به مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و یا نتایج تایید شده دیگری دارد. در میان محققین، انجام پژوهشهای تجربی ارزش بسیاری دارد و اگر بتوان آزمایش مطلوبی انجام داد، تحلیلهای زیادی را بر محور آنها میتوان گسترش داد و اطلاعات فراوانی بدست آورد. در هر صورت با دسترسی به دستگاههای محاسبه گر و رایانه های قوی ، امروزه در بسیاری از موارد آنالیز دینامیک سیالات و انتقال حرارت با روشهای عددی انجام می پذیرد. هرچه پدیده مورد بررسی پیچیدگی بیشتری داشته باشد، روشهای عددی اهمیت بیشتری پیدا می کنند.

علاوه بر سرعت بیشتر محاسبات عددی، می توان با این روشها اطلاعات کامل با جزئیات بیشتر، از قبیل تغییرات سرعت ، فشار ، درجه حرارت و غیره رادر سراسر حوزه مورد نظر به دست آورد. در مقابل، اغلب اوقات شبیه سازی آزمایشگاهی جهت بدست آوردن این گونه اطلاعات مشکل و مستلزم صرف زمان زیاد بوده و در بعضی شرایط غیر ممکن است. در اکثر مسایل مربوط به مکانیک سیالات ، به دلیل پیچیدگی معادلات مربوطه ، استفاده از حل تحلیلی امکان پذیر نمی باشد. در این تحقیق نیز به کمک نرم افزار و با استفاده از مدلسازی، به بررسی یک پدیده فیزیکی اقدام کرده ایم. جهت انجام این تحقیق نیاز است تا معادلات دیفرانسیل پاره ایی را حل کنیم که این عمل تنها با استفاده از روشهای عددی امکان پذیر است. حل عددی این معادلات از طریق دانش مکانیک سیالات محاسباتی صورت می

گیرد. در این تحقیق حل این معادلات به کمک نرم افزار Fluent، انجام می شود که در ادامه به شرح قسمتی از کارایی های این نرم افزار می پردازیم. فلونت یک نرم افزار کامپیوتری چند منظوره برای مدل سازی جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی در هندسه نوشته شده است. با توجه به محیط مناسب نرم افزار جهت تعریف مساله و شرایط های پیچیده، تعریف شرایط مرزی گوناگون و حل مسایل پیچیده شامل تاثیر پدیده های مختلف به کمک این نرم افزار قابل حل می باشد.

فلونت برای آنالیز و حل مسایل طراحی خاص، روشهای شبیه سازی کامپیوتری متفاوتی را بکار می برد. برای راحتی کار، تعریف مساله، محاسبه و دیدن نتایج، منوهای مختلفی در نظر گرفته شده است. وقتی نیاز باشد، Fluent می تواند مدل مورد نظر را از دیگر برنامه های (نرم افزارهای) تولید مدل که با آنها سازگاری دارد وارد کند. این نرم افزار امکان تغییر شبکه به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه های بی سازمان برای هندسه های پیچیده فراهم می سازد. نوع شبکه های قابل تولید و دریافت توسط این گروه نرم افزاری شامل شبکه هایی با المانهای مثلثی و چهار ضلعی (برای هندسه های دو بعدی) و چهار وجهی، شش وجهی، هرمی یا گوه ای (برای هندسه های سه بعدی) می باشد.

همچنین Fluent به کاربر اجازه دستکاری شبکه (مثلا ریز کردن یا درشت کردن شبکه در مرز و مکانهای لازم در هندسه) را می دهد. این بهینه سازی برای حل شبکه، قابلیت در اختیار کاربر قرار می دهد که نتایج را در نواحی که دارای گرادیانهای بزرگ (مثل لایه مرزی و...) باشند، دقیقتر سازد. این قابلیتها مدت زمانی را که برای تولید یک شبکه خوب مورد نیاز است، در مقایسه با حل در شبکه های بی سازمان به صورت قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. این نرم افزار با زبان برنامه نویسی C نوشته شده است و از تمامی توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می برد. نتیجتاً این نرم افزار با استفاده از حافظه دینامیک، ساختار مناسب داده ها و اطلاعات و کنترل انعطاف پذیر، محاسبات را ممکن می سازد. فلونت توانایی در نظر گرفتن شرایط مرزی متنوعی را برای مسائل مختلف دارد که عبارتند از:

- تعریف جریان ورودی از طریق سرعت

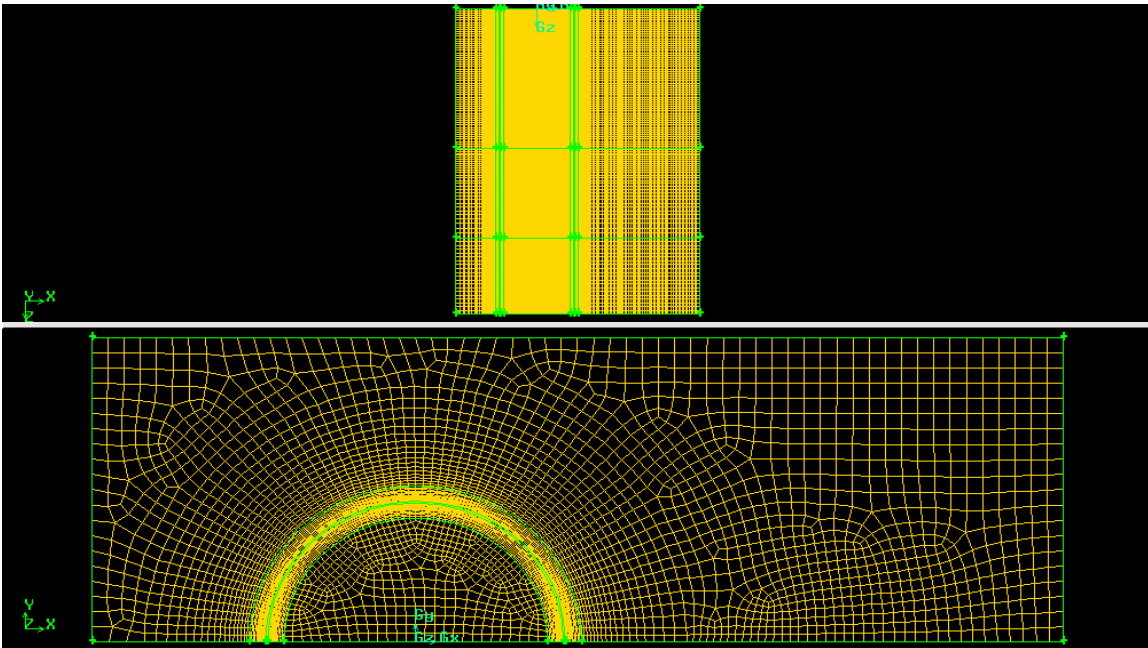
- تعریف جریان ورودی/خروجی از طریق اختلاف فشار، تعریف از طریق برون یابی و یا شرایط خروجی جریان توسعه یافته
- دیوارهای ثابت و یا متحرک/چرخان
- دیوارهایی که جریان بر روی آن می لغزد یا نمی لغزد
- دیوارهای هم دما یا با شار حرارتی مشخص یا شرایط انتقال حرارت جابجایی جامد هادی
- مرزهای متناوب (Periodic)
- مرزهای متقارن (Symmetry)
- مرزهای تکراری (Cyclic)

### ۳-۳ تنظیمات حل عددی در نرم افزار فلوئنت

در این قسمت نحوه تنظیمات برای شبیه سازی احتراق گازهای شیرین (گاز متان) در فلر به طور مختصر ارائه می گردد:



تولید مدل و شبکه بندی در گمبیت

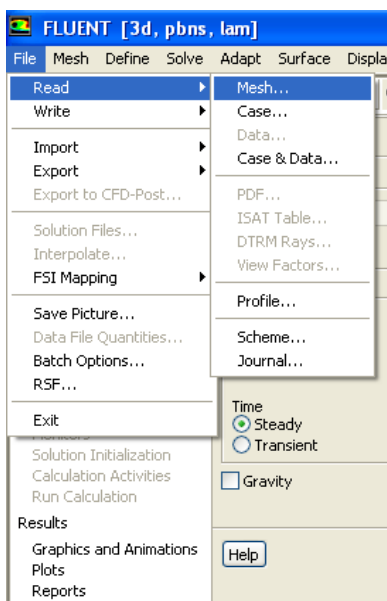


عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

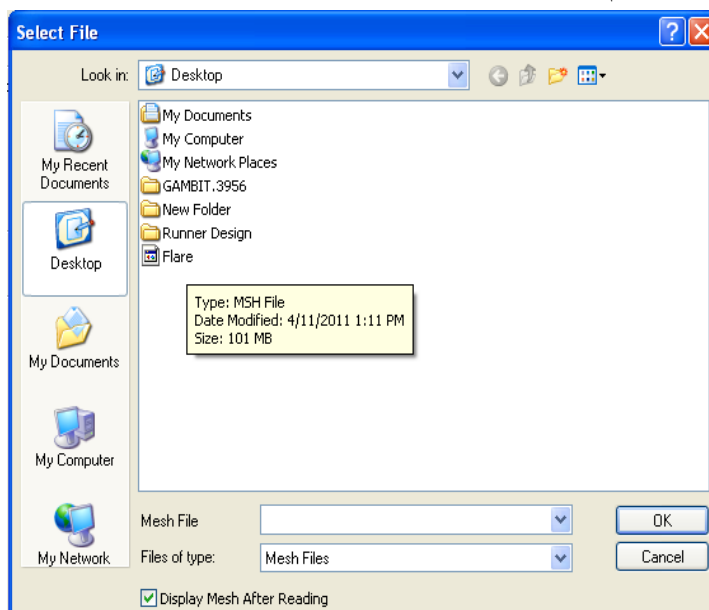
عنوان فصل: معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلونت



### File-Read-mesh

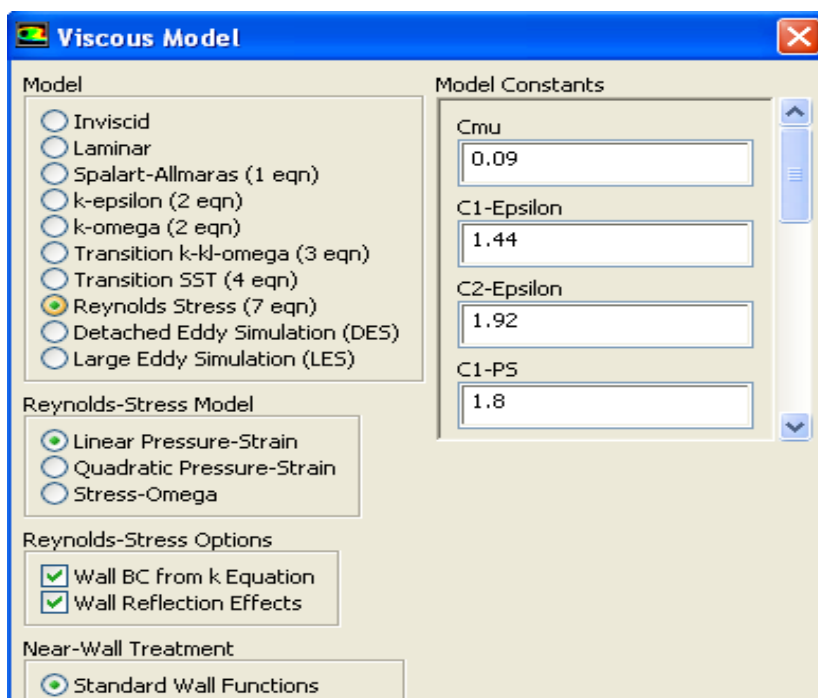


اجرای نرم افزار فلونت و خواندن فایل مش ایجاد شده توسط گمبیت



### Define-Models-Viscous

انتخاب مدل لزجت



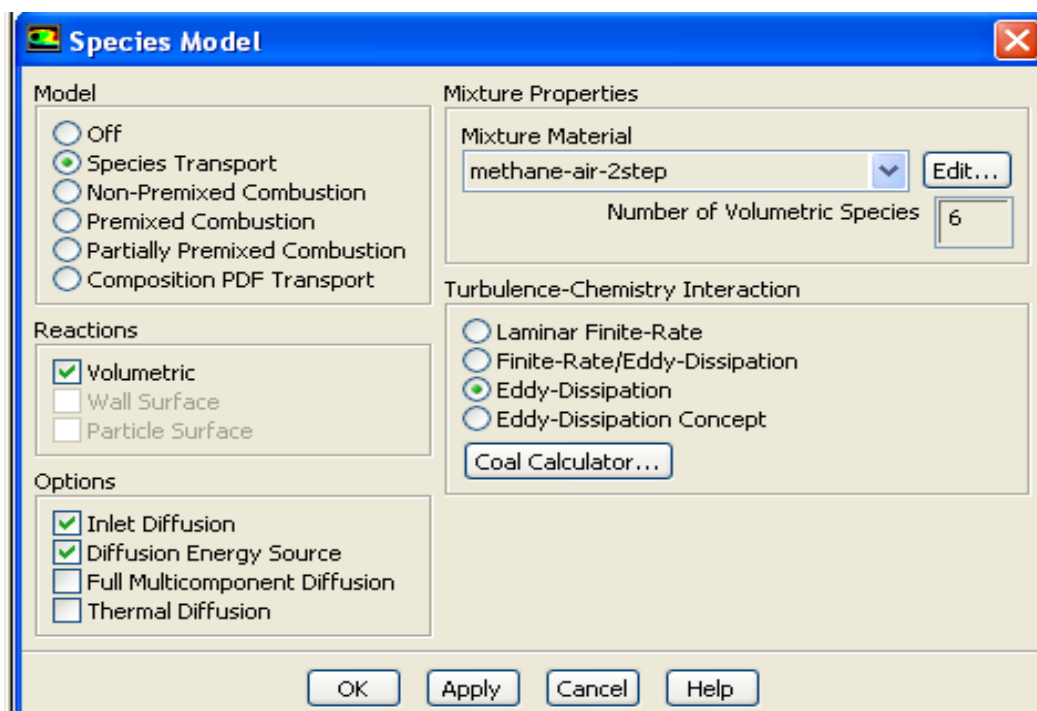
عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلونت



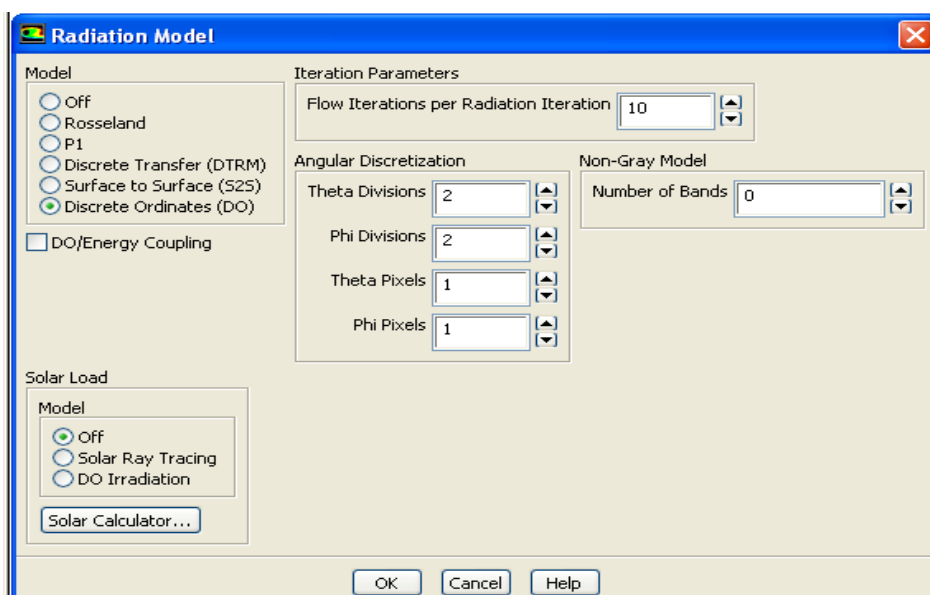
### Define-Model-Species model

انتخاب معادلات احتراق و گونه‌ها



### Define-Model-Radiation

فعال کردن معادلات تابش



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلونت



Define -Materials-create/edit materials

انتخاب نواحی سیال و جامد و

مشخص نمودن خواص آنها

مشخص نمودن پارامترهای

Define -operating conditions

محیطی

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلونت



Define -Boundary Condition-air inlet

انتخاب شرط مرزی برای ورود هوا و

کسر مولی گونه‌ها

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلونت



Define -Boundary condition- gas inlet

انتخاب شرط مرزی و کسر مولی

گازهای ورودی

Solve-Solution Methods

انتخاب الگوریتم حل عددی

### Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme  
SIMPLE

Spatial Discretization

Gradient  
Green-Gauss Cell Based

Pressure  
Standard

Momentum  
First Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy  
First Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate  
First Order Upwind

Solve-solution controls

انتخاب ضرایب حل معادلات حاکم

### Solution Controls

Under-Relaxation Factors

Pressure  
0.3

Density  
1

Body Forces  
1

Momentum  
0.7

Turbulent Kinetic Energy  
0.8

Default

Equations... Limits... Advanced...

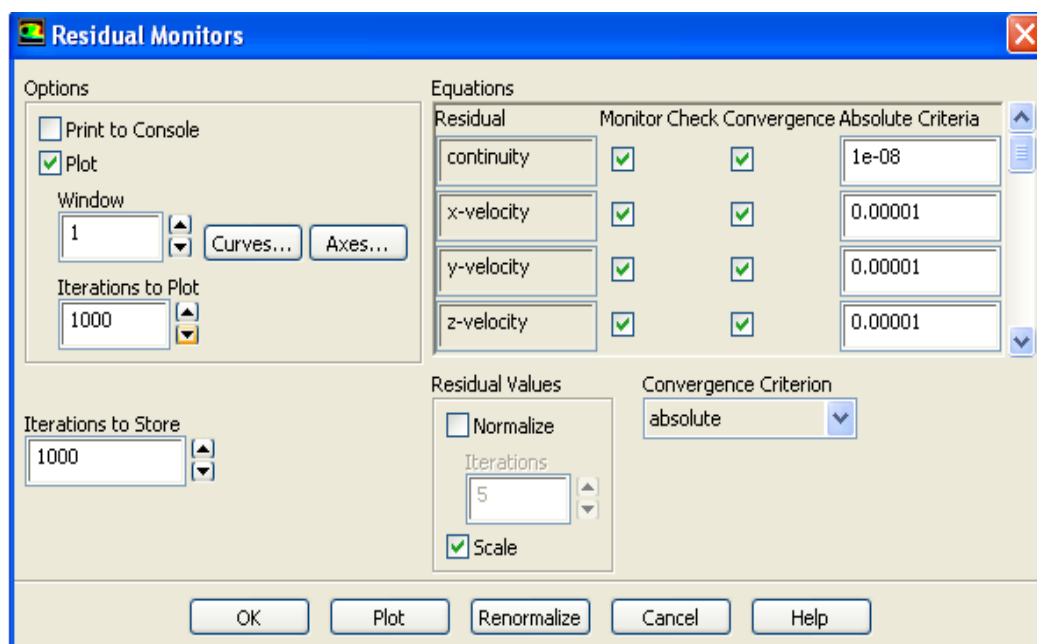
عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلونت



Solve-Residuals

انتخاب معیار همگرایی



Solve-solution initialization

مقدار دهی اولیه



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلونت



**Solution Initialization**

Compute from  
velocity\_inlet.8

Reference Frame  
 Relative to Cell Zone  
 Absolute

Initial Values

Gauge Pressure (pascal)  
0

X Velocity (m/s)  
2

Y Velocity (m/s)  
0

Z Velocity (m/s)  
0

Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)  
4

Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)  
1

Initialize    Reset    Patch...

Solve-calculate

شروع حل عددی

**Calculation**

Check Case...    Preview Mesh Motion...

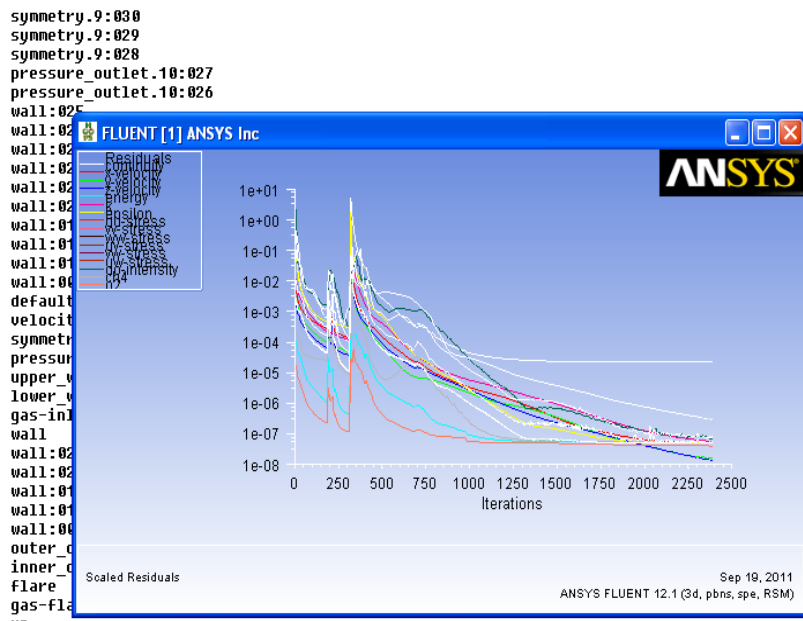
Number of Iterations: 1000    Reporting Interval: 1

File Update Interval: [ ]

Save File Quantities...    Acoustic Signals...

Calculate

Working  
Calculating the solution...  
Cancel





عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: معرفی و نحوه تنظیمات نرم افزار فلوئنت

در صورتیکه گاز ورودی به فلر یا زباله سوز حاوی گازهای  $CO$ ،  $CO_2$ ،  $H_2O$ ،  $N_2$  باشد، مراحل کار مطابق مراحل ذکر شده در بالا می باشد و تنها می بایست در قسمت شرایط مرزی ورودی کسر جرمی سایر گونه ها را نیز وارد نمود. اما در صورتیکه در گاز ورودی به فلر سایر ترکیبات مانند ترکیبات گوگردی با درصد قابل توجهی وجود داشته باشد، می بایست از قسمت انتخاب مدل احتراق و گونه ها، مدل **Non-premix** که امکان استفاده از مدل **PDF** را برای مدل سازی گونه ها دارد، استفاده نمود. با توجه به کاربرد زیاد این مدل در شبیه سازی های این پروژه در فصول بعدی تئوریهای این مدل احتراق آورده شده است.

## **فصل چهارم**

### **حل عددی و معادلات حاکم**

#### ۱-۴ مقدمه

امروزه استفاده از روشهای عددی در محاسبات مهندسی اهمیت ویژه پیدا کرده است و به عنوان ابزاری کارآمد در تحلیل مسائل مهندسی مطرح می گردد. علم دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> (CFD) به صورت یک ابزار توانا برای تحلیل رفتار جریان سیال و انتقال حرارت در سیستم های با هندسه و معادلات حاکم پیچیده برای محققان و مهندسان درآمده و در دهه گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است. پیچیدگی معادلات حاکم بر مسأله تأثیر متقابل فیزیکی مختلف، گذرا بودن اغلب مسایل مهندسی، بالا بودن هزینه های مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از دستگاههای اندازه گیری در بسیاری از کاربردهای علمی، از جمله دلایلی هستند که استفاده از روشهای تحلیلی و آزمایشگاهی را در مقایسه با روشهای عددی محدود می کند.

در این فصل، ابتدا قوانین اساسی شبیه سازی و معادلات حاکم بیان می شوند؛ این معادلات شامل بقاء جرم، مومنتوم، انرژی، احتراق و آلاینده ها می باشد. سپس به معرفی اساس روش حجم کنترل پرداخته خواهد شد و در ادامه مراحل حل عددی توسط نرم افزار فلونت تشریح خواهد شد.

#### ۲-۴ معادلات حاکم

معادلات بقاء جرم، مومنتوم، انرژی و معادلات انتقال گونه ها در یک شبیه سازی احتراق از جمله معادلات مهم می باشند. همچنین در جریانهای آشفته، معادلات مربوط به محاسبه ترمهای آشفستگی نیز باید حل شوند.

<sup>2</sup> Computational Fluid Dynamics

#### ۴-۲-۱ معادله بقاء جرم

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} + \text{div}(\hat{\rho} \hat{u}) = \hat{m}_v \quad (۴-۱)$$

که در آن، علامت (^) بیانگر مقادیر لحظه‌ای است. در حقیقت، قانون بقای جرم، بیان می‌کند که تفاضل شارهای ورودی و خروجی به حجم معینی از سیال، با مجموع نرخ تغییر چگالی سیال و نرخ جرم اضافه شده از تبخیر ذرات سوخت، در آن حجم، برابر می‌باشد.

#### ۴-۲-۲ معادله بقاء مومنتوم

$$\nabla(\hat{\rho} \hat{v} \hat{v}) = -\nabla p + \nabla(\mu(\nabla \hat{v} + (\nabla \hat{v})^T)) - \hat{\rho} \hat{v}' \hat{v}' \quad (۴-۲)$$

که ترم های نوسانی بردار سرعت، ویسکوزیته سیال و فشار است. تنش های رینولدز، ترم های اضافی هستند که از متوسط گرفتن متغیرهای نوسانی ایجاد شده اند. این عبارات برای بسته شدن دستگاه معادلات باید مدل شوند.

#### ۴-۲-۳ مدلسازی تلاطم

جریانهای سیالی را به جریانهای آرام و مغشوش می‌توان دسته‌بندی کرد. در جریانهای آرام، ذرات سیال در امتداد مسیرهای همواری که درون لایه ها قرار دارند، حرکت می‌کنند و یک لایه به آرامی بر روی لایه مجاور می‌لغزد. این در حالی است که مسیرهای ذرات سیال در جریانهای مغشوش، نامنظم می‌باشند که این امر، موجب انتقال اندازه حرکت و گرما از یک بخش سیال به بخش دیگر آن، می‌شود. اغلب جریانهایی که در طبیعت و صنعت رخ می‌دهند، از نوع جریانهای مغشوش می‌باشند. با مرور بر رابطه ارائه شده در معادله ۴-۲، می‌توان مشاهده کرد که معادلات حاکم بر جریانهای مغشوش، شامل مجهولات جدیدی به شکل بوده که تنشهای رینولدز نامیده می‌شوند. هیچ راه مستقیمی برای محاسبه این تنشها وجود ندارد و باید آنها را از طریق مدلسازی تعیین نمود. که این امر بر عهده مدل‌های اغتشاش نهاده می‌شود. در حقیقت، یک مدل اغتشاش، مدلی است که به تعداد مجهولات ناشی از

اغتشاش جریان ( )، به معادلات حاکم، اضافه می کند تا دستگاه معادلات حاکم بر جریان، قابل حل شود.

به طور کلی مدل های تلاطم را می توان به دو گروه تقسیم کرد. مدل هایی که از مفهوم لزجت گردابه ای استفاده می کنند و مدل هایی که تنش های رینولدز را مستقیماً از معادلات به دست می آورند. (بدون استفاده از لزجت گردابه ای). مدل استفاده شده در این پروژه با توجه به چرخشی بودن جریان از مدل تنشهای جبری ASM استفاده شده است که جزئیات آن بدین شرح است. در این مدل سعی شده است که برای تعیین تنش های رینولدز معادلات ترابری جبری به دست آید.

#### الف- مدل سازی جملات اتلاف:

در اعداد رینولدز بالا که در اینجا مورد نظر است، حرکت تلاطمی اتلافی و در مقیاس کوچک گردابه های کوچک، می تواند به طور محلی همسانگرد فرض شود، به طوری که ساده ترین تقریب برای جملات اتلاف می تواند به صورت زیر به دست آید:

$$2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} = \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} \varepsilon \quad 3-4$$

که در رابطه فوق:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad 4-4$$

#### ب- مدل سازی جملات پخش:

لازمه بالا بودن عدد رینولدز در جریان های متلاطم اجازه می دهد که جمله پخش در اثر لزجت صرف نظر شود. همچنین جملات پخش در اثر فشار که نشان دهنده ترابری به وسیله فشار می باشد نیز قابل صرف نظر کردن است. باقیمانده جمله پخش یعنی — مرتبط است با جابه جایی انرژی تلاطم به وسیله حرکت تلاطمی به طوری که همبستگی سه تایی سرعت می تواند به صورت زیر مدل شود.

$$\overline{u'_i u'_j u'_k} = C_s \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_k u'_l} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_l} \quad 5-4$$

که در رابطه فوق  $C_s$  یک ثابت است و مقدار آن مساوی  $0.22$  است.

ج- جملات فشار- کشیدگی:

مدل سازی جملات فشار- کشیدگی به صورت زیر انجام می شود:

$$\left( \frac{u'_i}{\varepsilon_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) = -C_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \right) - C'_1 \rho \left( p_y - \frac{2}{3} p \delta_y \right) \quad 6-4$$

که در رابطه فوق  $C_1, C'_1$  مقادیر ثابت بوده و:

$$\left( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + u'_i u'_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right), p = \frac{1}{2} p_u = -\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad 7-4$$

در رابطه (4-8) مقدار  $C_1$  و  $C'_1$  به ترتیب  $1/5$  و  $0.6$  می باشد. حال، چنانچه نتایج به دست

آمده از مدل سازی تلاطم را در رابطه 4-4 جایگذاری کنیم، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} &= -\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} - \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon - C_j \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) - \\ & - \frac{2}{3} p \delta_y \left) + C_s \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_k u'_l} \frac{\partial \overline{u'_i u'_l}}{\partial x_l} \right) \end{aligned} \quad 8-4$$

در این مدل مقدار شش رینولدز از شش معادله جبری به دست می آید. البته برای محاسبه  $k$  و  $\varepsilon$

لازم است دو معادله دیفرانسیل حل شوند. بنابراین می توان گفت مدل تنش جبری یک مدل دو معادله ای

است.  $C_{11}$  را از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\frac{21 - C'_1}{3} \frac{1}{C_1} \left[ 1 + \frac{1}{C_1} \left( 1 - C'_1 \frac{p}{\varepsilon} \right) \right] / \left[ 1 + \frac{1}{C_1} \left( \frac{p}{\varepsilon} - 1 \right) \right]^2 \quad 9-4$$

مدل اغتشاش بکار رفته در این رساله، مدل تنش جبری بوده است که با توجه به شکل هندسی خاص، شرایط مرزی و اندازه گیریهای آزمایشگاهی، روابط آن ساده شده و به فرم زیر در محاسبات بکار رفته اند [۱۹].

$$\overline{u'v'} = \left[ \frac{-2/3\alpha(1-\alpha P/\varepsilon) - 3\alpha(\alpha+\lambda)\overline{v'w'}/\varepsilon}{1+k^2/\varepsilon^2(\alpha+\lambda)(w/r)(\alpha\partial w/\partial r + \lambda w/r)} \frac{w}{r} \right] \frac{k^2}{\varepsilon} \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \right) \quad -\varepsilon \quad 10$$

$$\overline{v'w'} = \left[ \frac{-2/3\alpha(1-\alpha P/\varepsilon)}{1+4k^2/\varepsilon^2(\alpha+\lambda)(w/r)(\alpha\partial w/\partial r + \lambda w/r)} \right] \frac{k^2}{\varepsilon} \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \right) \quad -\varepsilon \quad 11$$

$$\overline{v'^2} = \left[ \frac{2/3k(1-\alpha P/\varepsilon) + 2(\alpha+\lambda)k/\varepsilon\overline{v'w'}/r}{1+2\alpha k/\varepsilon(\partial v/\partial r)} \right] \quad -\varepsilon \quad 12$$

$$\overline{w'^2} = \left[ \frac{2/3k(1-\alpha P/\varepsilon) - 2k/\varepsilon\overline{v'w'}/r(\alpha\partial w/\partial r + \lambda w/r)}{1+2\alpha k/\varepsilon(v/r)} \right] \quad -\varepsilon \quad 13$$

#### ۴-۲-۴ معادله بقاء انرژی

معادله انرژی در حالت کلی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \bar{v})) + \quad (14-4)$$

که ضریب رسانش گرمایی مؤثر، شار پخشی گونه و آنتالپی است.

#### ۵-۲-۴ مدلسازی احتراق

در مدلسازی احتراق غیر آدیاباتیک با استفاده از مفهوم کسر مخلوط، معادله انرژی در فرم انتالپی

کلی عبارتست از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{H}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{H}) = \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla \bar{H} \right) + S_h \quad -\varepsilon) \quad (15)$$



که  $k_t$  ضریب هدایت آشفته می باشد. همچنین انتالپی کلی عبارتست از:

$$H = \sum_j Y_j H_j \quad (16)$$

که در آن  $Y_j$  کسر جرمی گونه  $j$ ام می باشد و داریم:

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \quad (17)$$

که  $h_j^0(T_{ref,j})$  انتالپی تشکیل گونه  $j$ ام در دمای مرجع می باشد. ترم چشمه در رابطه (17-4) مربوط به واکنش شیمیایی است و برابر است با:

$$S_h = -\sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (18)$$

که  $h_j^0$  انتالپی تشکیل گونه  $j$ ام و  $R_j$  نرخ تشکیل جزء حجمی گونه  $j$ ام می باشد. لازم به ذکر است که در معادله انرژی به شکل انتالپی کلی (رابطه 4-17) گرمای تشکیل گونه‌ها در انتالپی کلی گنجانده شده است. در فصل‌های 5 و 6 مدل‌ها و معادلات احتراق و آلاینده‌ها به تفصیل بررسی خواهند شد.

#### 4-3 حل معادلات حاکم

نرم افزار فلونت معادلات حاکم را با استفاده از روش حجم کنترل حل می‌کند. روش حجم کنترل به عنوان یک فرمول‌بندی اختلاف محدود ویژه، توسعه و در چهار برنامه اصلی تجاری CFD مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتمهای عددی شامل مراحل زیر می‌باشند:

انتگرال کلی از معادلات حاکم بر جریان سیال روی تمام حجم کنترل مربوط به میدان حل. گسسته‌سازی؛ شامل جایگذاری نوعی از تقریبهای اختلاف محدود برای عبارتهای داخل معادله انتگرالی می‌باشد، که فرآیندهای جریان مثال جابه‌جایی، نفوذ و چشمه‌ها را نشان می‌دهد. این عمل معادلات انتگرالی را به یک سیستم معادلات جبری تبدیل می‌کند.

- حل معادلات جبری با استفاده از روش تکرار.

### تشریح روش حجم کنترل

قدم اول، یعنی انتگرال گیری از حجم کنترل، روش حجم محدود را از سایر روشهای CFD متمایز می کند. دیدگاه حجم محدود بقاء محلی هر خاصیت از سیال را برای هر حجم کنترل تضمین می کند. این رابطه روشن بین الگوریتم عددی و قاعده کلی بقاء اصل فیزیکی، یکی از جاذبه های اصلی روش حجم محدود تشکیل می دهد و درک مفاهیم آن را برای مهندسين، خیلی ساده تر از روشهای عنصر محدود و طیفی برای بقاء یک متغیر جریان مهیا می کند. برای مثال یک مؤلفه سرعت یا آنتالپی در داخل یک حجم کنترل را، می توان به صورت یک تساوی بین فرآیندهای متفاوت که منجر به افزایش یا کاهش آن می شود نشان داد:

نرخ تغییر در حجم کنترل نسبت به زمان شار خالص به دلیل جابجایی در داخل حجم کنترل + شار خالص به دلیل نفوذ در داخل حجم کنترل + نرخ خالص تولید در داخل حجم کنترل برنامه های CFD، شامل روشهای گسسته سازی مناسب، برای حل پدیده های انتقالی مهم، جابه جایی (انتقال به دلیل جریان سیال)، نفوذ (انتقال به دلیل تغییرات از نقطه ای به نقطه دیگر) و همچنین عبارات چشمه (همراه با تولید یا اتلاف) و نرخ تغییر نسبت به زمان می باشند. همچنین پدیده های فیزیکی اساسی، پیچیده و غیر خطی می باشند بنابراین یک روش حل تکرار مورد نیاز است. فهم مناسب الگوریتم حل عددی نیز یک مسئله مهم است. سه ایده ریاضی در مشخص کردن کارایی یا عدم کارایی هر یک از الگوریتمها مفید است:

- همگرایی
- سازگاری
- پایداری

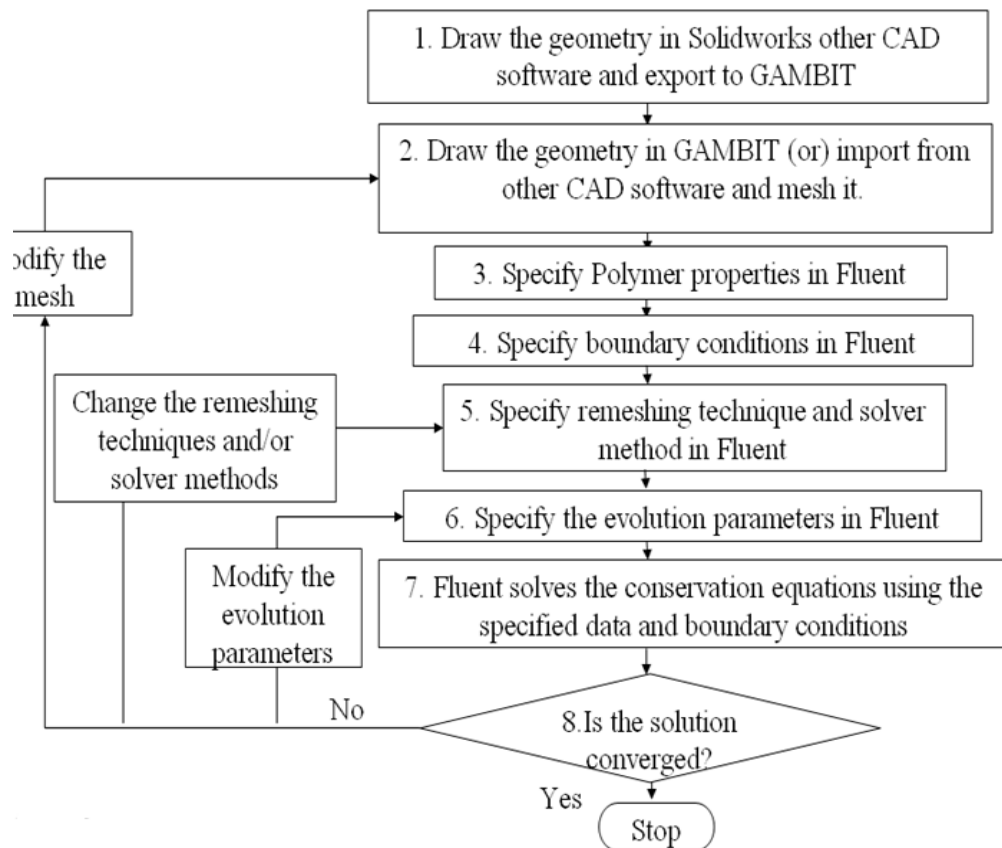
همگرایی، خاصیتی از روش عددی برای به دست آوردن جوابی است که به حل دقیق نزدیک می باشد. به طوری که فاصله شبکه، اندازه حجم کنترل یا المان به صفر میل می کند. طرحهای عددی

سازگار، دستگاهی از معادلات جبری را ایجاد می کند، به می توان نشان داد با معادله حاکم اصلی زمانی که فاصله شبکه به سمت صفر می کند، معادل می باشد. پایداری در روش عددی با میرایی خطاها همراه می باشد. اگر یک روش پایدار نباشد، حتی با گرد کردن خطاها در داده های اولیه، می تواند موجب واگرایی یا نوسانات زیاد گردد. برنامه قدرتمند Fluent از روش حجم کنترل برای حل معادلات حاکم استفاده می کند که در ادامه به معرفی مختصری از این نرم افزار پرداخته خواهد شد.

#### ۴-۴ چرخه محاسباتی

فلوچارت مختصری از روند حل عددی در فلونت در ذیل ارائه شده که در آن مراحل اصلی چرخه محاسباتی آورده شده است. در هر پروژه، ابتدا حوزه فیزیکی انتخاب شده و هندسه مورد مطالعه توسط نرم افزار جانبی گمبیت مدل و مش زده می شود. سپس این مدل شبکه بندی شده توسط نرم افزار فلونت فراخوانده می شود و شرایط مرزی، مدل های مناسب برای شبیه سازی تلاطم و احتراق و خواص فیزیکی سیال تأثیر گذار در حوزه حل عددی انتخاب خواهد شد. در هر مرحله از حل، اگر اختلاف مقادیر در پارامتر محاسبه شده فعلی با مرحله قبل از مقدار مشخصی کمتر بود عملیات متوقف می گردد. شرط همگرایی در این کار از مرتبه  $10^{-5}$  است. به عنوان مثال، قدر مطلق اختلاف دما در تکرار جدید و تکرار قبلی کمتر از مقدار همگرایی ( $10^{-5}$ ) است. مراحل ذکر شده در شکل ۴-۲ نشان داده شده اند.

## Flowchart for numerical simulation using Fluent®



شکل ۴-۲ فلوجارت حل عددی فلونت

## **فصل پنجم**

### **معادلات و تئوری‌های احتراق**

اولین منبع تامین انرژی که زندگی بشر را متحول ساخت، احتراق بوده است. امروزه اکثر انرژی مصرفی جهان از راه احتراق فراهم می شود. زندگی جانداران توسط احتراق به دلیل تولید آلاینده های محیط زیست و گازهای گلخانه ای مانند دوده، منو اکسید کربن و اکسید های نیتروژن و همچنین تغییر آب و هوای زمین در معرض تهدید است. کاهش منابع سوخت های فسیلی و اثرات مضر آلاینده های ناشی از احتراق باعث توجه به فرآیند احتراق، در جهت افزایش راندمان احتراق و کاهش آلاینده های حاصل از آن شده است. از آنجایی که نگرانی افزایش آلاینده ها رو به افزایش می باشد، نیاز به کنترل آلاینده های احتراق از جمله دوده و اکسید نیتروژن ضروری به نظر می رسد. پارامترهای مختلفی بر احتراق تاثیر گذارند و بهترین عملکرد برای یک کوره به طور آزمایشگاهی سخت و دشوار می باشد، بنابراین از حل عددی برای بهینه سازی محفظه های احتراق استفاده کرد.

مطالعات و بررسی هایی که جهت تجزیه و تحلیل عملکرد کوره ها و آلاینده ها صورت گرفته است، اثر پارامترهای مختلفی را به طور جداگانه و نه بطور همزمان تحقیق نموده اند. دما و آلاینده های کوره وابستگی زیادی به پارامترهایی از قبیل پیش گرم کردن، عدد چرخش، نسبت هم ارزی و قطر قطرات پاشش شده دارد ضروری است تا اثرات این پارامترها به صورت جامع و همزمان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و بهینه شوند.

## ۲-۵ احتراق آشفته (Turbulent Combustion)

تقریباً در تمام فرآیندهای صنعتی، احتراق در جریان آشفته صورت گرفته و تنها در مواردی مانند شعله شمع، کبریت و فندک می توان به شعله آرام اشاره نمود. از جمله اهداف مطالعه و بهبود سیستمهای احتراقی افزایش راندمان، کاهش مصرف سوخت و کاهش تولید آلاینده های حاصل از احتراق می باشد. مطالعه دقیق پارامترهای موثر بر احتراق و تشکیل آلاینده ها نیاز به استفاده از مدل های دقیق و توانا جهت توصیف پدیده احتراق و اعمال اثرات آشفتهگی دارد. آشفتهگی سبب افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا و در

نتیجه بهبود احتراق می گردد. همچنین نرخ واکنشهای شیمیایی نیز در جریانهای آشفته تا چندین برابر افزایش می یابد. با توجه به اهمیت این موضوع در سالهای اخیر و بدلیل عدم امکان استفاده از حل های تحلیلی، استفاده از روشهای عددی در مطالعه جریانهای آشفته احتراقی بسیار توسعه یافته است. اما همچنان پیچیدگی توصیف پدیده احتراق (حتی در شعله آرام) که گاه شامل صدها گونه و هزاران واکنش می باشد، و همزمانی آن با پیچیدگیهای جریان آشفته و اعمال اثرات متقابل آشفتهگی - احتراق سبب شده تا این موضوع همچنان به عنوان یک موضوع چالش برانگیز مطرح باشد.

### ۳-۵ اختلاط در جریانهای احتراقی

در فرآیند احتراق، سوخت و اکسید کننده می بایست در سطح مولکولی با یکدیگر مخلوط گردند و این اختلاط پیش نیاز اصلی احتراق می باشد [۵ و ۶]. در احتراق آشفته این فرآیند وابستگی زیادی به اختلاط آشفته دارد. در جریانهای واکنش دهنده بر حسب مشخصه زمانی جریان و مشخصه زمانی واکنشهای شیمیایی می توان از اثر همزمان دینامیک سیالات و واکنشهای شیمیایی بر همدیگر صرف نظر نموده و فقط یکی از آنها را بعنوان پارامتر کنترل کننده بررسی نمود. عدد دامکوهلر<sup>۳</sup> که نسبت مشخصه زمانی جریان به مشخصه زمانی واکنشهای شیمیایی می باشد، می تواند بعنوان معیار مناسبی جهت ارزیابی اهمیت اعمال اثرات همزمان دینامیک سیالات و واکنشهای شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد [۶ و ۸]. با توجه به طیف وسیع زمان واکنشهای شیمیایی در یک سیستم، عدد دامکوهلر نیز می تواند در طیف وسیعی تغییر کند. در اعداد دامکوهلر خیلی بزرگ، واکنش خیلی سریع به جریان پاسخ داده و شرایط تعادلی برقرار است. در این محدوده مطالعه مخلوط واکنش دهنده ها بطور مجزا از دینامیک سیالات قابل بررسی می باشند. اما در اعداد دامکوهلر خیلی کوچک، واکنشها بصورت منجمد مدل شده و اثرات جریان در آنها قابل صرف نظر می باشد. در این محدوده می توان فرض نمود اختلاط در مخلوط واکنش دهنده ها در سطح مولکولی بطور همگن صورت گرفته و پروسه اختلاط بسیار سریع صورت می گیرد. اما در محدوده اعداد دامکوهلر واحد،

<sup>۳</sup> Damkohler number

تبادل میان واکنش‌ها و دینامیک سیالات بسیار قوی بوده و اثر هر دو آنها می‌بایست در مدلسازی منظور گردد. به همین دلیل در استفاده از مدل‌های ارائه شده برای محاسبه نرخ واکنش می‌بایست توانایی‌های مدل در اعداد دامکوهلر مختلف را مد نظر داشت. یکی از مدل‌های بسیار توانا و مناسب در محاسبه نرخ واکنش‌های شیمیایی، مدل آرنیوس می‌باشد که در حال حاضر در اکثر نرم افزارها و کدهای عددی مدلسازی واکنش‌های شیمیایی مانند (Chemkin) از آن استفاده گردیده است [۸ و ۷]. این مدل بر اساس تئوری برخورد ارائه گردیده [۹] و در پیش بینی فرایندهای شیمیایی با بیش از صدها گونه و هزاران واکنش با نرخهای متفاوت از توانایی بالایی برخوردار است. سادگی معادلات، حجم محاسبات پایین و امکان استفاده از آن در کدهای عددی از مزایای عمده این مدل می‌باشد. اما از آنجا که این مدل تعداد برخورد بین مولکول‌های واکنش دهنده را بر اساس سینتیک مولکولی گازها و تحت تاثیر جنبش مولکولی گازها ناشی از دما محاسبه می‌کند، اثرات جریان و آشفته‌گی بر افزایش نرخ برخورد و در نتیجه افزایش نرخ واکنشها در آن در نظر گرفته نشده و در جریانهای آشفته نرخ واکنش را بسیار کمتر از مقدار واقعی آن محاسبه می‌کند. همانطور که قبلاً گفته شد استفاده از این مدل در اعداد دامکوهلر خیلی کوچک بدلیل امکان صرف نظر کردن از اثرات دینامیک جریان بر نرخ واکنش قابل استفاده می‌باشد. اما احتراق بخصوص در جریانهای آشفته سوختهای فسیلی جزو واکنشهای با اعداد دامکوهلر بالا بوده و اثر جریان بر نرخ واکنش قابل صرف نظر نمی‌باشد. در اعداد دامکوهلر بالا، با فرض واکنشهای بسیار سریع، عامل محدود کننده نرخ واکنش، آشفته‌گی و اختلاط جریان سوخت و اکسید کننده می‌باشد و به همین دلیل از اثر سرعت واکنش شیمیایی صرف نظر می‌گردد [۹ و ۱۰]. اما به مرور زمان با توجه به اهمیت مطالعه تشکیل آلاینده‌ها در احتراق آشفته و نرخ پایین تشکیل آنها، مدل‌های ارائه شده بر مبنای عدد دامکوهلر بالا (فرض واکنشهای با نرخ بسیار زیاد) فرض صحیحی نبوده و برای محاسبه آلاینده‌ها نیاز به مدل‌هایی می‌باشد که بتواند نرخ واکنشهای مختلف را با در نظر گرفتن اثرات آشفته‌گی بر آنها محاسبه نماید. معمولاً این مدلها بر اساس مدل آرنیوس بنا شده و اثر نوسانات غلظت گونه‌ها و دما در جریان آشفته را در محاسبه نرخ واکنشهای شیمیایی از طریق ریاضیات پیچیده و



توابع آماری وارد محاسبات می‌کند. از جمله موفق‌ترین این مدلها می‌توان به مدل PDF<sup>۴</sup> و DNS<sup>۵</sup> اشاره نمود. با این وجود مدل‌هایی چون DNS با وجود توانایی و دقت بالا بدلیل هزینه محاسباتی بسیار بالا تنها برای موارد محدود با هندسه ساده و در مراکز تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱]. در زیر مدل‌های مختلف محاسبه نرخ واکنش در اعداد دامکوهلر مختلف معرفی شده و بر اساس آن مدل آرنیوس اصلاح شده برای جریانهای آشفته ارائه خواهد گردید.

#### ۴-۵ مدل‌های محاسبه نرخ واکنش در جریانهای آشفته احتراقی

##### ۱-۴-۵ مدل شکست گردابه‌ای

یکی از مدل‌های موفق در مدلسازی جریانهای آشفته، مدل شکست گردابه‌ای (EBU<sup>۱</sup>) بوده که در سال ۱۹۷۰ توسط اسپالدینگ ارائه شده است [۱۲]. در این مدل نرخ واکنش بر حسب پارامترهای آشفستگی بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

(۱-۵)

که در آن و مقدار انرژی آشفستگی و نرخ اتلاف آن و نوسانات غلظت گونه‌ها می‌باشد. محاسبه عبارت مربوط نوسانات غلظت گونه‌ها ( ) در این مدل بسیار پیچیده بوده و به آسانی قابل محاسبه نمی‌باشد. از طرفی همانطور که مشاهده می‌شود اثر وابستگی نرخ واکنشهای شیمیایی به دما و انرژی فعالسازی و همچنین اثر نوسانات دما در این مدل دیده نشده است. در سال ۱۹۷۵ مگنسن و هرتاگر عبارت نوسانات غلظت گونه‌ها را بر حسب مقادیر متوسط غلظت گونه‌های واکنش دهنده و محصولات بصورت زیر جایگزین نمودند [۱۳]:

⁴ Probability Density Function

⁵ Direct Numerical Solution

⁶ Eddy Break UP

(۲-۵)

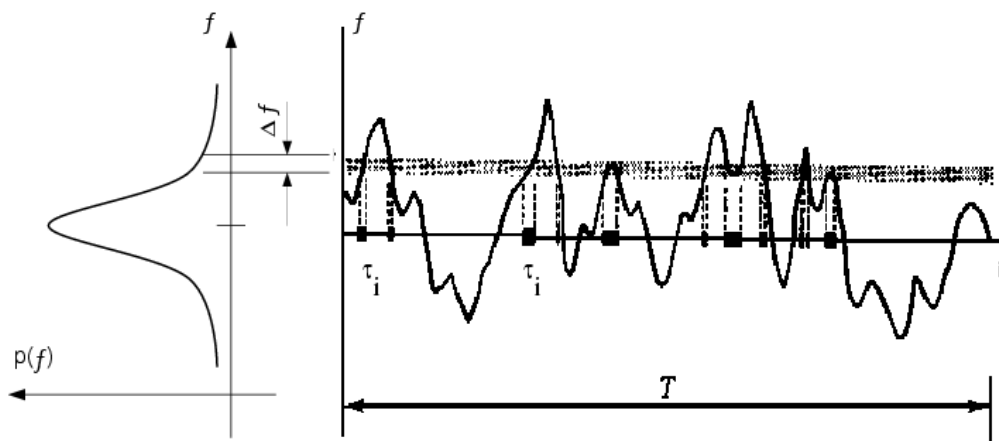
با این جایگذاری، با استفاده از معادله (۲-۵) براحتی با محاسبه مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  از مدل آشفتگی و دینامیک جریان و مقادیر معلوم غلظت گونه‌ها، نرخ واکنش محاسبه می‌گردد. این مدل بدلیل سادگی برنامه‌نویسی و هزینه کم محاسبات در اکثر کدهای CFD و برنامه‌های تجاری مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. دقت این مدل در واکنشهای یک مرحله‌ای بسیار خوب بوده، اما برای واکنشهای دو مرحله‌ای احتراق سوخت (تبدیل سوخت هیدروکربنی به گونه‌های میانی مانند CO و سپس تبدیل این گونه‌ها به محصولات نهایی  $H_2O$  و  $CO_2$ ) بدلیل در نظر گرفتن نرخ یکسان برای هر دو مرحله واکنش، نتایج بدست آمده با تقریب زیادی قابل قبول و استفاده می‌باشد [۱۰]. اما در واکنشهای بیش از دو مرحله و برای واکنشهای با نرخ پایین مانند تشکیل NO و دوده دقت مدل بسیار پایین بوده و حتی بدلیل ارائه نتایج غلط قابل استفاده نمی‌باشد. از طرفی بدلیل پیچیدگی ساختار مولکولی سوخت‌های سنگین، تعداد گونه‌های حاصل از احتراق و تعداد مراحل واکنش بسیار زیاد شده و مدلسازی احتراق این سوختها با واکنشهای یک مرحله‌ای، علاوه بر عدم پیش بینی بسیاری از گونه‌های میانی مهم مانند CO،  $H_2$ ، استیلن و غیره نتایج خوبی در پیش بینی دما نیز ندارد. با توجه به وابستگی شدید فرآیند تشکیل آلاینده‌ها (مانند دوده، اکسیدهای نیتروژن و گوگرد) به غلظت گونه‌های میانی حاصل از احتراق، استفاده از این مدل در مدل‌های جدید تشکیل آلاینده‌ها، امکان پذیر نمی‌باشد. در حال حاضر در مطالعه تشکیل آلاینده‌ها یا از اثر آشفتگی بر نرخ واکنش صرف نظر نموده و از روابط تجربی و نیمه تجربی به فرم آرنیوسی برای محاسبه نرخ واکنش استفاده می‌نمایند و یا با استفاده از مدل‌های مبتنی بر تابع چگالی احتمال (PDF) و روشهای مشابه که نیازمند ریاضیات پیچیده، هزینه و زمان محاسبات بسیار بالا می‌باشد، استفاده می‌گردد.

۲-۴-۵ مدل تابع چگالی احتمال با توزیع فرضی<sup>۷</sup>

تابع توزیع چگالی احتمال (PDF) که با  $p(f)$  نشان داده می‌شود، توصیف کننده نوسانات لحظه‌ای کمیت  $f$  در جریان آشفته می‌باشد و می‌تواند بعنوان کسری از زمان که سیال خاصیت  $f$  را دارد، در نظر گرفته شود. در شکل ۵-۱ تغییرات متغیر  $f$  (بعنوان مثال کسر مخلوط) در یک نقطه از جریان در زمانهای مختلف و در سمت چپ آن تابع چگالی احتمال،  $p(f)$ ، برای این متغیر نشان داده شده است. سطح زیر نمودار  $p(f) \Delta f$ ، نشان دهنده کسری از زمان است که متغیر  $f$  در محدوده  $\Delta f$  می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴ و ۱۵]:

$$p(f) \Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (3-5)$$

که  $T$  مقیاس زمانی و مدت زمانی است که متغیر  $f$  در محدوده  $\Delta f$  صرف می‌کند.



شکل ۵-۱. توصیف شماتیک تابع چگالی احتمال

شکل تابع  $p(f)$  به طبیعت اغتشاشات متغیر  $f$  در جریان آشفته وابسته است. در جریانهای واقعی توزیع  $p(f)$  مشخص نمی‌باشد، به همین دلیل در روش تابع چگالی احتمال با توزیع فرضی، بر اساس مشاهدات تجربی یک تابع ریاضی  $p(f)$  برای در نظر گرفته می‌شود که تقریبی از شکل واقعی آن می‌باشد. با مشخص بودن توزیع  $p(f)$  مقادیر متوسط گیری شده متغیر  $f$  قابل محاسبه هستند. دما و کسر جرمی

متوسط گیری شده بر اساس چگالی<sup>^</sup> در یک سیستم آدیاباتیک بصورت زیر قابل محاسبه می باشد.

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 p(f) \phi_i(f) df \quad (4-5)$$

همچنین چگالی متوسط در این سیستم بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \int_0^1 \frac{p(f)}{\rho(f)} df \quad (5-5)$$

برای سیستمهای با دو کسر مخلوط و تابع چگالی احتمال متفاوت، این رابطه قابل توسعه است که می توان در مرجع [۱۴] مشاهده نمود. در معادلات ۴-۵ و ۵-۵ با مشخص بودن شکل تابع  $p(f)$ ، حالت محلی سیال در تمام نقاط جریان قابل تعیین می باشد. در مدل PDF،  $p(f)$ ، عموماً از شکل توابع و یا استفاده می شود که تابع بصورت:

$$p(f) = \begin{cases} 0.5, & f = \bar{f} - \sqrt{f'^2} \\ 0.5, & f = \bar{f} + \sqrt{f'^2} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (6-5)$$

و تابع بصورت:

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1} df} \quad (7-5)$$

در نظر گرفته شده اند. در تابع شکل ، مقادیر و بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\alpha = \bar{f} \left[ \frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{f'^2} - 1 \right] \quad (8-5)$$

$$\beta = (1-\bar{f}) \left[ \frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{f'^2} - 1 \right] \quad (9-5)$$

نکته مهم در تابع شکل های فوق، وابستگی آنها تنها به دو متغیر و که به ترتیب کسر مخلوط

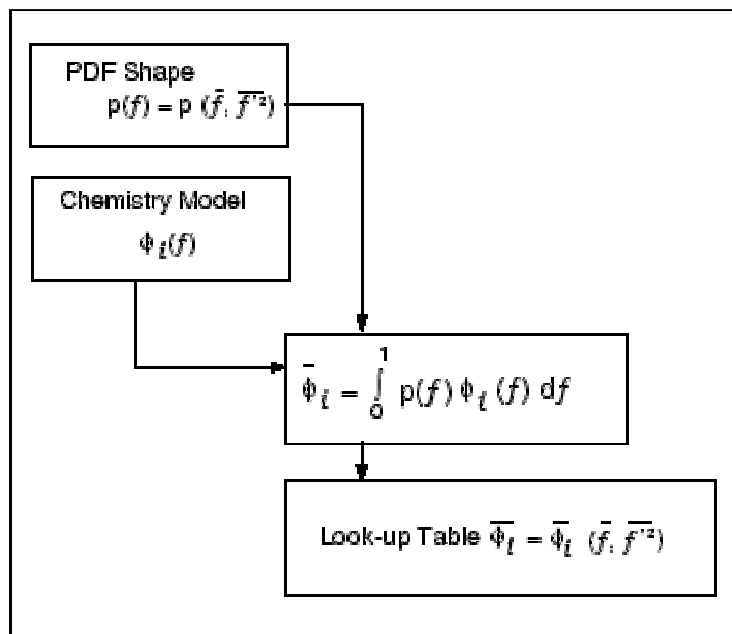
و واریانس کسر مخلوط بوده و از دو معاله بقا به فرم :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_{tm} + S_{user} \quad (10-5)$$

<sup>^</sup> Density-weighted mean species mass fractions

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f'^2}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f'^2} \right) + C_{g\mu_t} (\nabla f)^2 - C_{dp} \frac{\epsilon}{k} \bar{f'^2} + S_{\text{USI}} \quad (11-5)$$

محاسبه می شوند. مقادیر اختلاف مقادیر لحظه‌ای و متوسط کسر مخلوط  $f$  ( )  
 بوده و به ترتیب ترم چشمه برای مسائل مختلف مانند تبخیر قطرات سوخت و یا چشمه‌های  
 اضافه شده توسط کاربر می‌باشد. با توجه به مطالب فوق، اثر آشفتگی بر نرخ واکنشهای شیمیایی در مدل  
 PDF با تابع شکل مشخص، بصورت شکل ۵-۲ می‌باشد [۱۴]. پس از اصلاح نرخ واکنشهای شیمیایی  
 مقادیر کسر جرمی گونه‌ها، چگالی و دما بر حسب مقادیر مختلف  $f$  و در جداول مشخصی<sup>۹</sup> ذخیره  
 شده و در حین حل عددی جریان آشفته احتراقی از آن استفاده می‌شود. این مدل محدودیتی در محاسبه  
 تعداد گونه‌های شیمیایی و واکنشها ندارد.



شکل ۵-۲. وابستگی منطقی  $p(f)$ ،  $f$  و مدل شیمیایی برای محاسبه کسر جرمی گونه‌ها، دما و چگالی  
 اما با توجه به فرضی بودن توابع شکل و بر اساس مشاهدات و تغییر ساختار اغتشاشات در  
 جریانهای مختلف، دقت این مدل به تطابق توزیع اغتشاشات جریان واقعی با توابع فرضی فوق دارد. پس از  
 اصلاح نرخ واکنشهای شیمیایی مقادیر کسر جرمی گونه‌ها، چگالی و دما بر حسب مقادیر مختلف  $f$  و

<sup>۹</sup> Look-up table

در جداول مشخصی ذخیره شده و در حین حل عددی جریان آشفته از آن استفاده می‌شود. این مدل محدودیتی در محاسبه تعداد گونه‌های شیمیایی و واکنشها ندارد. با وجود فرضی بودن توابع شکل و برای جریانهای مختلف مورد مطالعه، بدلیل محاسبه غلظت گونه‌های میانی و اثرات آشفستگی بر آن، این مدل نسبت به مدل احتراق اتلاف گردابه‌ای ( مگنسن - هرتاگر) از دقت بسیار بهتری برخوردار است. از طرفی برای محاسبه آلاینده‌ها نیز اطلاعات جامع‌تری از غلظت‌ها و دما در اختیار می‌باشد. در مدل‌های مختلف PDF که بدنبال محاسبه دقیق تابع شکل هستند، زمان بالای محاسبات و پیچیدگی بسیار زیاد ریاضی آنها، عملاً آنها را برای مسائل صنعتی و هندسه‌های حتی کمی پیچیده غیر قابل استفاده نموده است [۱۱].

## **فصل ششم**

### **معادلات و تئوری آلاینده‌ها**

## ۱-۶ مقدمه

از زمان برپایی آتش، آلودگی هوا با انسان بوده است ولی در دوران‌های مختلف به جنبه‌های متفاوتی از آلودگی اهمیت داده شده است. در مقیاس کوچک آلودگی‌های محلی که اثراتی از مزاحمت‌های ساده تا بیماری‌های خطرناک و دیرعلاج را باعث می‌شوند مورد توجه می‌باشند و در حد جهانی مسائلی مثل تخریب لایه ازن، باران‌های اسیدی و گرمایش زمین مورد توجه و بحث است. منشاء آلودگی‌های هوا در اوایل انقلاب صنعتی عمدتاً صنایع و سوخت زغال سنگ بوده است و در قرن بیستم و بیست و یکم مسئولیت آلودگی هوا در شهرها با حمل و نقل درون شهری می‌باشد. سوخت‌های فسیلی در حمل و نقل صنعت از یک طرف و فرآیندهای صنعتی با مصرف مواد خام و محصولات تولیدی از طرف دیگر از عوامل عمده آلودگی‌های دست ساز می‌باشند. در این فصل طبقه بندی و بررسی اثرات آلاینده‌های مهم هوا به ویژه دو آلاینده دوده و اکسید ازت، مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند.

## ۲-۶ طبقه بندی آلاینده های هوا

آلاینده های هوا را به چند طریق تقسیم کرده اند که از آن جمله می‌توان به تقسیم از نظر منشاء آلودگی که اولیه و ثانویه می‌باشد و تقسیم از نظر اثرات فیزیولوژیکی اشاره نمود.

### ۱-۲-۶ تقسیم بندی از نظر منشاء تولید

آلاینده های اولیه آنهایی هستند که به همان شکل و ترکیبی که از منبع تولید خارج شده اند در هوا وجود دارند و آلاینده های ثانویه معمولاً از ترکیب آلاینده های اولیه تحت تاثیر اشعه خورشید تولید می‌شوند. اولیه مانند  $SO_2$ ،  $CO$ ،  $HC$  و ثانویه مثل اسماگ فوتوشیمیایی، اوزن و قسمت عمده  $NO_2$ .

### ۲-۲-۶ تقسیم بندی از نظر اثرات فیزیولوژیکی

آلاینده های هوا از نظر فیزیولوژیکی به ۵ گروه عمده تقسیم می‌شوند که عبارتند از :



- ۱) خفه کننده ها شامل خفه کننده های ساده مانند  $CO_2$ ، متان و سایر گازهای خنثی که با رقیق کردن اکسیژن محیط (محیط‌های بسته) باعث خفگی می‌شوند و خفه کننده های ترکیبی که به علت ترکیب با آنزیم‌ها و ارگان‌های بدن ایجاد خفگی می‌کنند مانند CO
- ۲) تحریک کننده ها شامل تحریک کننده های مجاری فوقانی تنفسی ( $SO_2$ ) و مجاری تحتانی تنفسی ( $NO_2$ ) می‌شوند.
- ۳) سموم سیستمیک که با حمله به ارگان‌ها باعث بیماری عضوی از بدن می‌گردند. مثل ترکیبات جیوه، سرب، هیدروکربن‌های آروماتیک
- ۴) ترکیبات مخدر و بیهوش کننده که روی اعصاب اثر می‌گذارند مثل هیدروکربن‌های الیفاتیک کلره
- ۵) مواد سرطان‌زا - بنزپیرن، بنزن، هیدروکربن‌های عطری چند هسته ای.

## ۳-۶ منابع آلودگی هوا

منابع انتشار آلاینده های هوا را به دو گروه ثابت و متحرک تقسیم کرده اند. گروه ثابت همانطور که از اسم آن‌ها پیداست شامل صنایع، نیروگاه ها و مراکز تجاری و مسکونی می‌شود و منابع متحرک انواع وسایل نقلیه از موتور سیکلت تا هواپیما و کشتی را شامل می‌گردد.

آلودگی هوا در صنایع هم به علت مصرف سوخت است و هم نوع فرآیند، در حالیکه در منابع متحرک عمدتاً حاصل احتراق سوخت بوده و به صورت گازهای آلاینده و یا ذرات، وارد هوا می‌شود. مقدار آلودگی تولید شده از منبع را با وزن آلودگی به واحد وزن مواد خام مصرفی یا محصول تولیدی بیان می‌کنند و به آن ضریب انتشار می‌گویند. ضریب انتشار برای آلاینده های مهم بعضی منابع بدون وسیله کنترل به شرح جدول‌های شماره ۱-۶ و ۲-۶ می‌باشد.

در صنایع، علاوه بر آلاینده های ناشی از سوخت و مواد خام، تولیدات میانی و محصول نهایی هم وارد هوا می‌شود [۱۶] مثلاً در صنعت آلومینیوم، فلوراید و ذرات هیدروکربن چند هسته ای عطری تولید می‌شوند. در صنایع فلزی، سرب وارد هوا می‌شود و از زباله سوزها، فلزات سنگین مثل کادمیوم و ترکیبات

خطرناک دی اکسین و فورین منتشر می‌شوند. نوع آلاینده و ضرایب انتشار برای صنایع با شناخت و بررسی فرآیند و در نهایت اندازه گیری امکان پذیر می‌باشد.

جدول ۶-۱. ضریب انتشار مواد نفتی بر حسب کیلوگرم آلودگی برای ۱۰۰۰ لیتر سوخت

VOC	NOx	Co	So3	So2	ذرات	دیگ بخار
۰/۰۹	۸	۰/۶	۰/۴۳ S	۱۹S	۱/۲۵۵	سوخت مازوت برای نیروگاهها
۰/۰۳۴	۶/۶	۰/۶	۰/۲۴ S	۱۹S	۱/۲۵۵	مازوت صنعتی
۰/۰۲۴	۲/۴	۰/۶	۰/۲۴ S	۱۷S	۰/۲۴	گازوئیل صنعتی
۰/۱۴	۶/۶	۰/۶	۰/۲۴ S	۱۹S	۱/۲۵۵	مازوت تجاری
۰/۰۴	۲/۴	۰/۶	۰/۲۴ S	۱۷S	۰/۲۴	گازوئیل تجاری
۰/۰۸۵	۲/۲	۰/۶	۰/۲۴ S	۱۷ S	۰/۳	نفت و گاز خانگی

S = درصد گوگرد موجود در سوخت

جدول ۶-۲. ضرایب انتشار برای اتومبیل و کامیون				
کامیون		اتومبیل		
دیزل G/km	جرقه ای G/km	کاهش در اتومبیل جدید (%)	ساخت قبل از ۱۹۶۸ G/km	آلودگی
۱۲	۷	۷۵	۲/۵	NOx
۱۷	۱۵۰	۹۵	۶۵	CO
۳	۱۷	۹۰	۱۰	هیدروکربن نسوخته
۰/۵	خیلی کم	۴۰	۰/۵	ذرات

#### ۴-۶ اثرات آلودگی هوا

اثرات مضر آلودگی هوا بر سلامت انسان، حیوان و گیاهان و همچنین تخریب مواد و آثار فرهنگی موضوع بررسی و مطالعات زیادی بوده است. طی چند دهه اخیر مساله باران‌های اسیدی، لایه اوزن و گرمایش زمین و پیامدهای آن بر اکوسیستم و در نهایت انسان، نیز مورد مطالعه و بحث دانشمندان قرار

گرفته است. از آنجا که عوامل زیادی در ارتباط بین آلودگی هوا و سلامت انسان موثرند، اثبات اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان مشکل خواهد بود. با این حال اطلاعات زیادی وجود دارد که می‌توان به آن‌ها استناد کرد. مطالعات اپیدمیولوژی، مطالعات انجام شده در محیط‌های کار و مطالعات روی حیوانات آزمایشگاهی بسیاری از اثرات نامساعد آلودگی هوا بر سلامت انسان را به خوبی نشان داده است. البته در این موارد عمدتاً غلظت‌های غیر معمول آلودگی مطرح بوده‌اند. در سال‌های اخیر نیز مطالعاتی در بعضی از شهرهای بزرگ و آلوده انجام گرفته و به روابطی بین غلظت آلودگی به خصوص در مورد ذرات معلق و میزان مرگ و میر دست یافته‌اند.

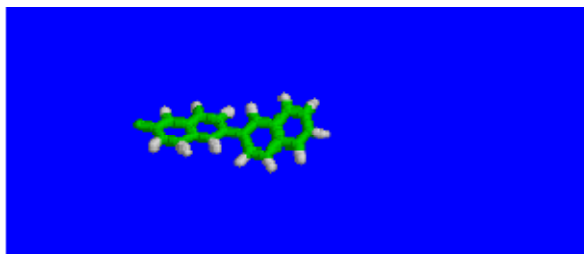
## ۵-۶ آلاینده دوده

در بسیاری از فرآیندهای احتراق، سوخت حالت مایع یا جامد داشته که پس از شروع احتراق تبدیل به گاز شده و به وسیله یک اکسید کننده گازی می‌سوزد. معمولاً جریان در احتراق این سوختها بصورت آشفته بوده و گونه‌های اصلی احتراق شامل  $C_xH_y$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  گونه ۵ می‌باشد. مکانیزمهای پیچیده حاکم بر احتراق سوختهای مایع و جامد سبب شده تا علاوه بر این گونه‌های اصلی، صدها گونه و رادیکال واسطه در حین واکنش تولید و مصرف شوند. در مواردی نیز این گونه‌های فرعی در حین فرآیند احتراق بصورت کامل مصرف نشده و همراه با سایر محصولات احتراق به محیط بیرون راه می‌یابند. بسیاری از این گونه‌ها (از جمله دوده، اکسیدهای نیتروژن و آروماتیکها) با وجود غلظت کم، برای محیط زیست بسیار مضر بوده و بعنوان آلاینده‌های محیط زیست معرفی گردیده‌اند. معمولاً سوختهای سنگینتر دارای احتراق پیچیده‌تر، تعداد گونه‌ها و واکنشهای بیشتر و خطرات آلاینده‌گی زیادتری می‌باشند. دوده یکی از این محصولات احتراق می‌باشد که معمولاً در نواحی پر سوخت شعله تولید شده و در صورت احتراق کامل آن در داخل کوره، سبب افزایش انتقال حرارت و راندمان احتراق می‌شود. اما در صورتیکه تمام دوده تولید شده، محترق و تبدیل به  $CO$  نشود، پس از خروج از کوره بعنوان یکی از آلاینده‌های مهم احتراق، شناخته می‌شود. در حال حاضر بسیاری از شهرهای بزرگ و صنعتی دنیا از وجود ذرات

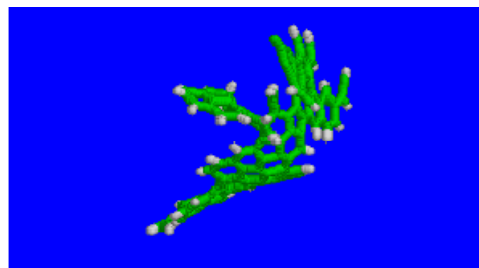
بسیار ریز دوده در هوای محیط خود رنج می‌برند. از نقطه نظر زیست محیطی نشر دوده در هوای محیط سبب بروز مشکلات قابل توجهی برای سلامتی مردم و سیستم تنفسی آنها می‌شود [۱۷]. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی حفاظت محیط زیست ذرات دوده (کمتر از  $2/5$  میکرون) بدلیل قطر خود می‌توانند وارد ششها شوند [۱۷]. آمار نشان می‌دهد حدود  $71\%$  خطر سرطان ناشی از هوای آلوده سمی بخاطر ذرات دوده می‌باشد. بر اساس این آمار اثرات دوده بر گرم شدن کره زمین به اندازه اثرات گلخانه ای گاز متان می‌باشد. منابع نفت خام شناخته شده، به میزان زیادی از روغنهای سنگین با ترکیبات پیچیده تشکیل شده که احتراق آنها بطور ذاتی سبب تولید زیاد دوده می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد حضور مقادیر کمی از آروماتیکها در سوخت، می‌تواند تولید دوده را به مقدار زیادی افزایش دهد [۱۸]. بهمین دلیل جهت کاهش دوده تولیدی از احتراق این سوختها، باید درک کاملی از فرآیند تولد، رشد و احتراق ذرات دوده بدست آورد. متاسفانه هنوز دانش بشری در مورد چگونگی تشکیل آلاینده دوده بسیار کم بوده و نیاز به تلاش بسیار در این زمینه می‌باشد [۱۷].

#### ۶-۵-۱ نحوه تشکیل دوده

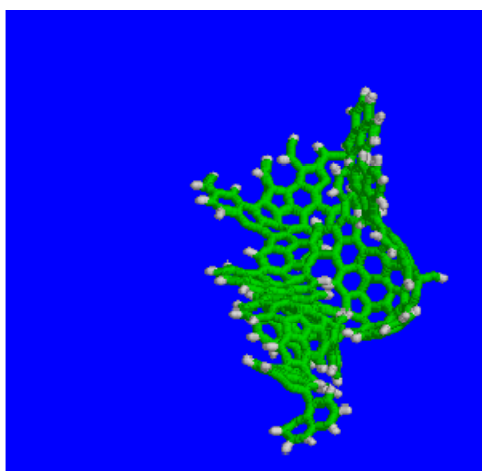
هنگامیکه مولکولهای سوخت در معرض اکسید کننده قرار می‌گیرند، گونه‌هایی تشکیل می‌دهند که در تولید دوده موثر می‌باشند. یکی از این گونه‌ها که بیشتر در نواحی پر سوخت تشکیل می‌شود، استیلین می‌باشد. از واکنش استیلین با CH یا  $CH_2$  محصول  $C_3H_3$  تولید شده که می‌تواند اولین حلقه‌های بنزن را از طریق واکنش با سایر گونه‌ها تولید نماید. از ترکیب حلقه‌های بنزن با یکدیگر هیدروکربنهای بزرگتری تولید شده که هیدروکربنهای حلقوی و چند حلقه‌ای (PAH) نامیده می‌شوند. این ترکیبات معمولاً تحت شرایط پر سوخت تشکیل شده و از گونه‌های میانی مهم در تشکیل دوده می‌باشند. بطوریکه از رشد این ترکیبات حلقوی اولین ذرات جامد با عنوان هسته‌های اولیه تولید دوده شکل می‌گیرند. در شکل ۶-۱ تصویری لحظه‌ای از فرآیند اتصال هیدروکربنهای حلقوی نشان داده شده است. این تصویر بر اساس محاسبات رایانه‌ای بدست آمده است [۱۷].



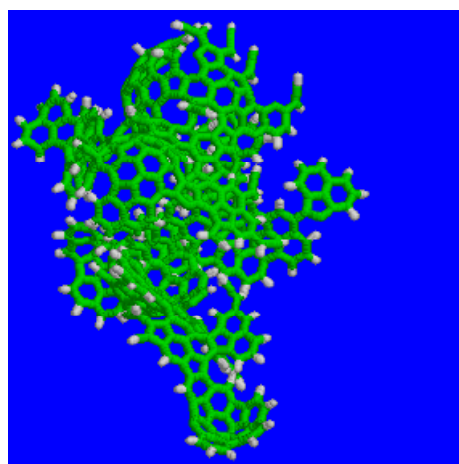
۱



۲



۳



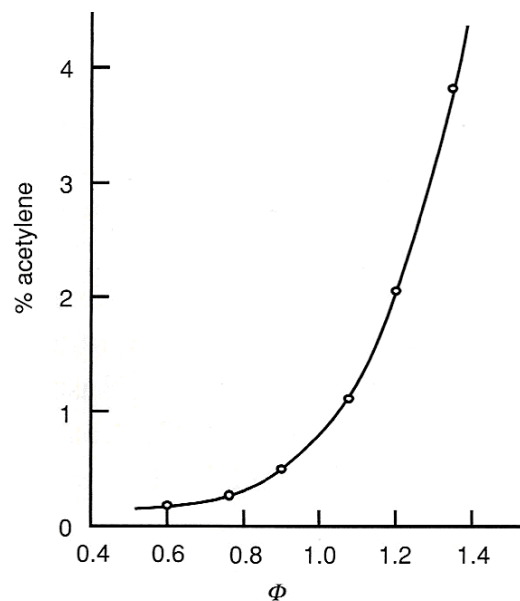
۴

شکل ۶-۱. فرآیند رشد و تشکیل ذرات دوده از مخلوط رادیکالها و مولکولهای هیدروکربنهای حلقوی

[۲۳]

استیلن، که تحت شرایط پ سوخت به مقدار زیادی تولید می‌شود، مهمترین گونه در تولید هیدروکربنهای حلقوی و دوده می‌باشد. در شکل ۶-۲ وابستگی تشکیل استیلن به نسبت هم ارزی در شعله-های متان-اکسیژن نشان داده شده است [۵]. مشاهده می‌شود در نسبت هم ارزی بیشتر از 0.8 > نرخ تولید استیلن شدیداً افزایش می‌یابد. هسته‌های تشکیل شده، از طریق رشد سطحی و انعقاد بزرگ می‌شوند. در رشد سطحی، فعل و انفعالاتی که در سطح خارجی هسته انجام می‌شود، مرتباً به قطر هسته می‌افزاید، این در حالی است که در فرآیند انعقاد، دو یا چند ذره به یکدیگر چسبیده و توسط یک پوسته خارجی احاطه می‌شوند. با افزایش اندازه ذرات ابتدا، رشد سطحی و سپس انعقاد متوقف می‌شود. خوشه شدن در فاز آخر رشد دوده صورت گرفته بطوریکه در طی آن ذرات بصورت تصادفی به یکدیگر چسبیده و ظاهری

شبهه به خوشه انگور را بوجود می‌آورند. نکته مهم در فرآیند تشکیل دوده این است که مجموعه این فرآیندها در زمانی حدود یک دهم ثانیه صورت می‌گیرد [۱۷]. هر خوشه شامل دویست تا ششصد ذره است که هر ذره شامل یکصد هزار تا یک میلیون اتم کربن می‌باشد. چگونگی بهم پیوستن تعداد زیادی از ذرات به یکدیگر و جوانه زنی فاز جامد در گاز، که در زمانی حدود یک دهم ثانیه صورت می‌گیرد، باعث پیچیدگی تحلیل فرآیند تشکیل دوده شده است.



شکل ۶-۲. وابستگی تشکیل استیلن در شعله های متان-اکسیژن به نسبت هم ارزی [۷]

دوده همزمان با رشد، در خلال فرآیندهای هسته سازی، رشد سطحی، انعقاد و خوشه‌ای شدن، می‌تواند محترق شده و به مونوکسید کربن، تبدیل شود. از این رو انتشار دوده از محفظه های احتراق به میزان تشکیل دوده و احتراق آن بستگی دارد.

#### ۶-۵-۲ مدل‌های تشکیل دوده

تشکیل و احتراق دوده، توسط مکانیزمهای بسیار پیچیده در ۴ مرحله هسته‌زایی، انعقاد، رشد سطحی و احتراق صورت می‌گیرد. مدل‌های ارائه شده برای توصیف این مکانیزمهای پیچیده، از روشهای مختلفی حاصل شده‌اند که بصورت: مدل‌های تجربی، نیمه تجربی و شیمی تفصیلی دسته‌بندی می‌شوند. مدل‌های تجربی روابطی هستند که مستقیماً از داده‌های آزمایشگاهی دوده بدست می‌آیند. در مدل‌های نیمه

تجربی به حل معادلاتی پرداخته می‌شود که ضرایب آنها را از روابط تجربی بدست می‌آید. در رهیافت شیمی تفصیلی، روابط حاکم بر پدیده مطالعه و به اجرا گذاشته می‌شوند. این رهیافت توانایی دنبال کردن مراحل تولید دوده را از تشکیل تا احتراق آن دارد. با این حال چنین رهیافتی نیاز به محاسبات بسیار سنگین برای مدلسازی سینتیک شیمیایی دارد. از طرفی هنگامیکه این رهیافت شیمی تفصیلی با دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه مدل‌های احتراق همراه گردد، زمان محاسبات آنقدر زیاد خواهد شد که هنوز این روش برای شبیه سازی کامل فرآیند به صورت اجرایی در نیامده است. به همین دلیل مدل‌های تجربی و نیمه تجربی با حجم محاسبات بسیار کمتر و دقت مناسب برای محاسبه دوده تولیدی در فرآیند احتراق گسترش و توسط محققین زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

#### ۶-۵-۲-۱ مدل خان-گریوز

یکی از اولین مدل‌های موفق که هنوز در مقالات و تحقیقات مختلف و نیز در نرم افزار Fluent برای شبیه سازی دوده مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل خان-گریوز می‌باشد [۲۵]. در این مدل با در نظر گرفتن تولید مستقیم دوده از سوخت از طریق یک واکنش شیمیایی، با یک رابطه به فرم آرنیوسی، نرخ تولید دوده بر حسب پارامترهای فشار جزئی سوخت، نسبت هم‌ارزی و درجه حرارت محاسبه می‌شود. ضریب پیش نما شامل نسبت هم‌ارزی و فشار جزئی سوخت بوده که نشان دهنده اهمیت این پارامترها در تولید دوده بوده و در این مدل نیز به آنها اهمیت خاصی داده شده است. بدین ترتیب نرخ تولید دوده از رابطه ساده زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_{\text{soot,form}} = C_s p_{\text{fuel}} \phi^r e^{-E/RT} \quad (1-6)$$

که در آن  $r$  به ترتیب ثابت تولید دوده و ثابت توان نسبت هم‌ارزی ( $\phi$ )، فشار جزئی سوخت می‌باشد.

#### ۶-۵-۲-۲ مدل دو مرحله ای تسنر

در مدل ارائه شده توسط تسنر و همکارانش تشکیل دوده در دو مرحله در نظر گرفته شده است [۲۶]. در این فرآیند دو مرحله‌ای ابتدا طی یک فرآیند شیمیایی رادیکالهای هسته از سوخت شکل می‌گیرند،

با تشکیل هسته‌های اولیه دوده، تعداد این هسته‌ها طی یک سری فرآیندهای فیزیکی (و شیمیایی) مانند برخورد ذرات هسته با ذرات دوده و با یکدیگر کاهش یا افزایش می‌یابند. در مرحله اول، نرخ تشکیل هسته از دو فرآیند تولید فوری هسته از سوخت ( ) و منشعب شدن آن از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_{nuc,form}^* = \eta_0 + (f - g)c_{nuc}^* - g_0 c_{nuc}^* N_{soot} \quad (۶-۲)$$

که در آن نرخ تولید فوری هسته از سوخت از رابطه آرنیوسی زیر محاسبه می‌شود.

$$\eta_0 = a_0 c_{fuel}^* e^{-E/RT} \quad (۶-۳)$$

که ضرایب آن عبارتند از:

$$c_{nuc}^* = \text{normalized nuclei concentration } (= \rho b_{nuc}^*)$$

$$a_0^* = a_0 / 10^{15}$$

$$a_0 = \text{pre-exponential rate constant (particles/kg-s)}$$

$$c_{fuel} = \text{fuel concentration (kg/m}^3\text{)}$$

$$f-g = \text{termination coefficient (s}^{-1}\text{)} = \text{linear branching}$$

$$g_0 = \text{linear termination on soot particles (m}^3\text{/particle-s)}$$

در این رابطه با وجود وابستگی ثابت نرخ پیش نما و دما به آشفتگی جریان، اثر اغتشاشات جریان بر نرخ تولید هسته که فرآیندی شیمیایی بوده، در نظر گرفته نشده است. در مرحله دوم هسته‌های تولید شده طی یک سری فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی به ذرات دوده تبدیل میشوند. نرخ تشکیل دوده از هسته، بر حسب جرم ذرات دوده، غلظت رادیکالهای هسته و تمرکز عددی ذرات دوده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$R_{soot,form} = m_p (\alpha - \beta N_{soot}) c_{nuc} \quad (۴)$$

$$m_p = \text{mean mass of soot particle (kg/particle)}$$

$$N_{soot} = \text{concentration of soot particles (particles/m}^3\text{)}$$



$C_{nuc}$  = radical nuclei concentration (particles/m<sup>3</sup>)

$\alpha$  = empirical constant (s<sup>-1</sup>)

= empirical constant (m<sup>3</sup>/particle-s)

۶-۵-۲-۳ مدل ماس - یانگ<sup>۱۰</sup>

این مدل بر خلاف مدل‌های قبلی عبارات مشخصی جهت محاسبه فرآیندهای هسته زایی، انعقاد، رشد سطحی و احتراق دوده ارائه داده است، بطوریکه نقش هر فرآیند در مدل‌سازی بطور مجزا قابل بررسی می‌باشد. در این مدل هسته زایی و تولید دوده از هسته تابع درجه اول غلظت سوخت و دما، همچنین انعقاد تابع ریشه دوم درجه حرارت در نظر گرفته شده است [۱۹].

$$\frac{\partial(\rho\xi_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{U}\xi_n) + \nabla \cdot (\rho U_{th}\xi_n) - \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_{n,Pr}} \right) \nabla \xi_n \right] = \alpha - \rho^2 \beta \xi_n^2 \quad (5-6)$$

$$\frac{\partial(\rho\xi_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{U}\xi_s) + \nabla \cdot (\rho U_{th}\xi_s) - \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_{s,Pr}} \right) \nabla \xi_s \right] = \delta - N_0^{1/3} \rho \gamma \xi_s^{2/3} \xi_n^{1/3} \quad (6-6)$$

بطوریکه  $\xi_s = \frac{\rho_s f_v}{\rho}$  ،  $\xi_n = \frac{n}{\rho N_0}$  و  $n$  عدد چگالی ذرات،  $N_0$  عدد آووگادرو،  $\rho_s$  چگالی ذرات دوده و  $f_v$  کسر حجمی دوده می‌باشد. مولفه سرعت  $U_{th}$  سرعت ناشی از گرادیان دما بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{th} = -0.54 \nu \nabla(\ln T) \quad (7)$$

پارامترهای  $\alpha$  و  $\delta$  تولید هسته های اولیه طی یک فرآیند شیمیایی از زنجیره‌های سوخت را در معادلات چگالی ذرات  $n$  و کسر حجمی دوده  $f_v$  نشان می‌دهند که از رابطه آرنیوسی به فرم زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = C_a \rho^2 T^{1/2} X_{fu} \exp(-T_a / T) = \delta / 144 \quad (8)$$

که در آن ثابت تجربی  $C_a$  و دمای فعالسازی  $T_a$  ، از اندازه‌گیری‌های شعله آرام بدست می‌آید [۲۰]. همانطور که پیشتر اشاره شد، عبارت نمایی در رابطه آرنیوس (فاکتور بولتزمن) تعیین کننده کسری از برخوردهای بین مولکولی با انرژی بالاتر از انرژی فعالسازی واکنش می‌باشد. در این مدل نیز ، در محاسبه

نرخ هسته زایی دوده، انرژی برخورد بین مولکولهای واکنش دهنده، بصورت تابع نمایی از دما وارد شده است. همچنین بدلیل وابستگی سرعت مولکولها به ، ثابت نرخ واکنش یا فرکانس برخورد در این رابطه با ریشه دوم دما متناسب است.

**انعقاد ذرات دوده** - اولین بار Heicken و Hudson [۲۱] با استفاده از تئوری جنبشی<sup>۱۱</sup> گازها ثابت نرخ انعقاد دوده  $(C+C_n \rightarrow C_{n+1})$  را محاسبه نمودند. بعنوان یک نتیجه مهم انرژی فعالسازی در انعقاد دوده نقشی نداشته و فقط بر اساس نرخ برخورد مولکولها، با ریشه دوم دما وابستگی مستقیم دارد. در مدل تشکیل دوده ماس و یانگ نیز مشاهده می شود که نرخ انعقاد ذرات با ریشه دوم دما متناسب است [۲۰]:

$$\beta = C_{\beta} T^{1/2} \quad (9)$$

که در آن یک ثابت تجربی و ، دمای فعالسازی، از اندازه‌گیری های شعله آرام بدست می‌آید. همانطور که مشاهده می‌شود نرخ انعقاد به تعداد برخوردهای بین مولکولی وابسته بوده و با تغییر سرعت مولکولهای گاز، نرخ برخورد نیز شدیداً تغییر می کند. همانطور که در فصل قبل هم توضیح داده شد، نرخ برخورد در جریان آشفته علاوه بر دما به شدت آشفتگی جریان نیز وابسته بوده و معادله فوق برای جریان آشفته نیاز به اصلاح دارد.

**رشد سطحی ذرات** - رشد سطحی ذرات بر خلاف انعقاد ذرات دوده، بیشتر ماهیت شیمیایی داشته تا فیزیکی و عامل آن افزوده شدن مواد گازی به مناطق فعال<sup>۱۲</sup> روی سطح ذرات دوده از طریق واکنشهای شیمیایی می‌باشد [۲۱]. نرخ رشد سطحی ذرات نیز بدلیل وابستگی به نرخ برخورد مولکولهای واکنش دهنده‌ها، با ریشه دوم دما متناسب است. از طرفی با توجه به وابستگی رشد سطحی به انرژی فعالسازی (فاکتور بولتزمن) این رابطه نیز به فرم آرنیوسی در آمده است.

$$\gamma = C_{\gamma} \rho T^{1/2} X_{fu} \exp(-T_{\gamma} / T) \quad (10-6)$$

که در آن یک ثابت تجربی و ، دمای فعالسازی، از اندازه‌گیری های شعله آرام بدست می‌آید.

<sup>۱۱</sup> Kinetic theory

<sup>۱۲</sup> Active sites

### ۳-۵-۶ مدل های پیشرفته تولید دوده

#### Moss-Brooks مدل ۱-۳-۵-۶

Moss و همکاران [۲۲] در سال ۱۹۹۹ دو پارامتر چگالی عددی ذرات دوده (N) و چگالی جرمی (M) را برای توصیف تولید دوده از شعله های پخشی آشفته بکار بردند. مدل آنها شامل نرخ جوانه زایی، انعقاد، رشد سطحی و احتراق<sup>۱۳</sup> بر اساس دو پارامتر M و N بود. در این مدل ترمهای چشمه این دو متغیر بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\frac{DN}{Dt} = \left(\frac{dN}{dt}\right)_{Inc.} + \left(\frac{dN}{dt}\right)_{Coa.} \quad (۱۱-۶)$$

$$\frac{DM}{Dt} = \left(\frac{dM}{dt}\right)_{Inc.} + \left(\frac{dM}{dt}\right)_{Coa.} + \left(\frac{dM}{dt}\right)_{Oxi.}$$

محاسبه هر یک از عبارت فوق در این بخش بررسی می گردد.

**جوانه زایی (Inception) - مدل Moss** بر مبنای تشکیل ذرات دوده از استیلن می باشد، بطوریکه جوانه زایی تابع مرتبه اولی از غلظت استیلن در نظر گرفته شده و نرخ جوانه زایی از رابطه آرنیوسی زیر محاسبه می گردد [۲۲]:

$$\left(\frac{DN}{Dt}\right)_{Inc.} = c_1 N_A \left(\rho \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}}\right) e^{-\frac{21100}{T}} \quad (۱۲-۶)$$

در این رابطه  $c_1 = 54s^{-1}$  می باشد. در معادلات فوق میزان تولید جرمی دوده (M) در مرحله جوانه زایی بر حسب تولید (N) در این مرحله از طریق رابطه زیر محاسبه می گردد [۲۲]:

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_{Inc.} = \frac{M_p}{N_A} \left(\frac{dN}{dt}\right)_{Inc.} \quad (۱۳-۶)$$

$M_p$  در این رابطه جرم هسته های دوده (1200kg/kmol) و  $N_A$  عدد آووگادرو ( $6.022 \times 10^{26}/\text{kmol}$ )

می باشد.

<sup>13</sup>Inception, Coagulation, Surface Growth and Oxidation

**انعقاد (Coagulation)** - برخورد ذرات دوده به یکدیگر سبب انعقاد آنها می‌شود. با فرض اینکه هر برخورد سبب ایجاد یک اتصال موثر بین ذرات خواهد شد، نرخ انعقاد با فرکانس برخورد برابر خواهد بود. فرکانس برخورد ذرات نیز با مشخص بودن اندازه ذرات و مسیر آزاد متوسط گاز محیط تعیین می‌گردد. با استفاده از فرکانس برخورد تعریف شده توسط Puri و همکاران و فرض ذرات کروی و تک انتشار (Mono dispersed) نرخ انعقاد از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$\left(\frac{DN}{Dt}\right)_{\text{Coa.}} = -\left(\frac{24R}{\rho_{\text{soot}} N_A}\right)^{1/2} \left(\frac{6}{\pi \rho_{\text{soot}}}\right)^{1/6} T^{1/2} M^{1/6} N^{11/6} \quad (14)$$

در این رابطه R ثابت جهانی گازها و  $\rho_{\text{soot}} = 2000 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد.

**رشد سطحی (Surface growth)** - رشد ذرات دوده توسط استیلن اضافی موجود و تعداد هسته‌های تولید شده، تعیین می‌شود. با این وجود باید در نظر داشت که نرخ رشد توسط دو عامل محدود می‌شود: میزان استیلن موجود در شعله و تعداد مناطق فعال روی سطح دوده. با در نظر گرفتن دمای فعال سازی 12100 k نرخ رشد از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۲]:

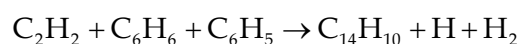
$$\left(\frac{DM}{Dt}\right)_{\text{Gro.}} = c_4 \left(\rho \frac{Y_{\text{C}_2\text{H}_2}}{W_{\text{C}_2\text{H}_2}}\right) e^{-\frac{12100}{T}} \left[(\pi N)^{1/3} \left(\frac{6m}{\rho_{\text{soot}}}\right)^{2/3}\right] \quad (15-6)$$

که  $c_4 = 9000.6 \text{ kg.m.kmol}^{-1}.\text{s}^{-1}$  می‌باشد.

#### ۶-۵-۳-۲ مدل پیشرفته تولید دوده Hall

Hall و همکاران [۲۳]، جوانه زایی دوده را بر مبنای نرخ تشکیل آروماتیکهای دو و سه حلقه‌ای

( $\text{C}_{10}\text{H}_7$  &  $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ ) از استیلن، بنزن و رادیکال فنیل ( $\text{C}_6\text{H}_5$ ) بر اساس مکانیزمهای زیر پیشنهاد نمودند:



آنها بر اساس نرخ تشکیل رادیکالهای  $\text{C}_{10}\text{H}_7$  و  $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$  از استیلن رابطه زیر را برای محاسبه نرخ تولید هسته در مرحله جوانه زایی پیشنهاد نمودند:

$$\left(\frac{DN}{Dt}\right)_{Inc.} = 8 \cdot c_2 \frac{N_A}{M_P} \left[ \rho^2 \left( \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \right)^2 \frac{Y_{C_6H_5}}{W_{C_6H_5}} \frac{W_{H_2}}{Y_{H_2}} \right] e^{-\frac{4378}{T}} \quad (17-6)$$

$$+ 8 \cdot c_3 \frac{N_A}{M_P} \left[ \rho^2 \frac{Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \frac{Y_{C_6H_6}}{W_{C_6H_6}} \frac{Y_{C_6H_5}}{W_{C_6H_5}} \frac{W_{H_2}}{Y_{H_2}} \right] e^{-\frac{6390}{T}}$$

که در آن،

$$c_2 = 127 \times 10^{8.88} \text{ and } c_3 = 178 \times 10^{9.50}$$

در این مدل بقیه مراحل رشد سطحی و انعقاد مانند مدل Moss محاسبه می شود. همانطور که مشاهده می شود این مدل برای محاسبه میزان هسته زایی دوده، نیاز به مدل شیمیایی احتراقی دارد که غلظت گونه‌های میانی فوق را جهت استفاده در عبارت چشمه فوق محاسبه نماید. نقش این گونه‌های میانی با اضافه شدن هیدروکربنهای حلقوی در ساخت سوخت اهمیت پیدا می کنند. در حال حاضر مدل‌های مبتنی بر جریان آشفته امکان محاسبه غلظت این گونه‌ها را ندارند و در صورت استفاده از مدل‌های مبتنی بر شیمی تفصیلی در جریانهای آشفته زمان محاسبات بقدری افزایش می یابد، که عملاً با سیستمهای رایانه‌ای موجود امکان پذیر نمی باشد. لذا مدل‌های شیمی تفصیلی بیشتر در جریانهای ساده آرام و مدل‌های صفر بعدی مورد استفاده قرار می گیرند [۲۶-۲۴].

#### ۶-۵-۴ مدل‌های احتراق دوده

در زمینه مدلسازی احتراق دوده مدل‌های مختلفی بر حسب شرایط شعله مورد مطالعه، نوع سوخت و نوع احتراق توسط محققین مختلف توسعه یافته‌اند. اما مهمترین آنها که برای شعله‌های پهنی آشفته قابل استفاده می باشند، در زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۶-۵-۴-۱ مدل Lee

رادیکالهای OH و O<sub>2</sub> دو گونه اصلی در احتراق دوده می باشند. از آنجا که اکسیژن موجود در محفظه به سرعت در اثر احتراق مصرف می شود، معمولاً نقش غلظت OH در احتراق دوده بسیار مهم می باشد. Lee در مدل خود سعی نمود اثر هر دو گونه فوق را در احتراق دوده بصورت زیر وارد محاسبات نماید [۲۹]:

$$\left(\frac{DM}{Dt}\right)_{Oxi} = c_5 \eta \rho \frac{Y_{OH}}{W_{OH}} \sqrt{T} (\pi N)^{1/3} \left(\frac{6M}{\rho_{soot}}\right)^{2/3} - c_6 \rho \frac{Y_{O_2}}{W_{O_2}} \exp\left(-\frac{19778}{T}\right) \sqrt{T} (\pi N)^{1/3} \left(\frac{6M}{\rho_{soot}}\right)^{2/3} \quad (24)$$

که ثابتهای معادله فوق عبارتند از:

$$\eta = 0.13, \quad c_5 = 105.81 \text{ kg.m.kmol}^{-1} \cdot \text{k}^{-1/2} \cdot \text{s}^{-1}, \quad c_6 = 8903.51 \text{ kg.m.kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

#### Edelman-Farmer مدل ۲-۴-۵-۶

در این مدل نرخ احتراق دوده تابع غیر خطی از فشار جزئی اکسید کننده می باشد. بر اساس این

مدل نرخ احتراق دوده بصورت زیر محاسبه می شود [۳۰]:

$$R_{ox} = 12 \left[ \left( \frac{k_A P_{O_2}}{1 + k_Z P_{O_2}} \right) \chi + k_B P_{O_2} (1 - \chi) \right] [\text{gm/cm}^2 \cdot \text{sec}] \quad (25-6)$$

$$\chi = \left[ 1 + \frac{k_T}{k_B P_{O_2}} \right]^{-1} \quad (26-6)$$

که ثابتهای معادله فوق عبارتند از:

$$k_B = 4.46 \times 10^{-3} \exp(-15,200/RT), \quad k_T = 1.51 \times 10^5 \exp(-97,000/RT), \quad k_A = 20 \exp(-30,000/RT),$$

#### (Eddy Break Up) مدل شکست گردابه‌ای ۳-۴-۵-۶

در این مدل، اکسیداسیون دوده به نرخ احتراق سوخت وابسته بوده و به مقدار اکسیژن (در صورت

وجود اکسیژن به مقدار کافی) یا هیدروکسید وابسته نمی باشد. در این مدل اثر اختلاط و توربولنسی در

کنترل فرآیند احتراق نقش اساسی داشته بطوریکه، نرخ احتراق دوده، بصورت زیر محاسبه می شود [۱۳]:

$$R_{soot, combustion} = \min(R_1, R_2)$$

$$R_1 = A \rho Y_{soot} \frac{\varepsilon}{k} \quad (27-6)$$

$$R_2 = A \rho \left( \frac{Y_{ox}}{\nu_{soot}} \right) \left( \frac{Y_{soot} \nu_{soot}}{Y_{soot} \nu_{soot} + Y_{fuel} \nu_{fuel}} \right) \frac{\varepsilon}{k}$$

که:

A = constant in the Magnussen model

Y<sub>ox</sub>, Y<sub>fuel</sub> = mass fractions of oxidizer and fuel

ν<sub>soot</sub>, ν<sub>fuel</sub> = mass stoichiometries for soot and fuel combustion

با توجه به عدم وابستگی این عبارت به غلظت گونه‌های میانی و اعمال اثرات آشفستگی بر نرخ احتراق، عموماً در جریانهای آشفته از این مدل استفاده می‌شود.

### ۶-۵-۵ دوده و نقش آن در انتقال حرارت تابشی

در فضاهایی مانند کوره‌ها و محفظه‌های احتراق، که اختلاف دما بین نواحی آن زیاد می‌باشد، بدلیل وجود سطوح و گازهای مختلف نشر دهنده، پخش کننده و جذب کننده شار تابش، انتقال حرارت تابشی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. در احتراق سوخته‌های گاز معمولاً درخشندگی شعله پایین بوده و تابش آن قابل توجه نمی‌باشد ولی در احتراق سوخته‌های مایع به ویژه هیدروکربنهای سنگین، شعله آنها بسیار درخشان بوده و تابش نقش مهمی در انتقال حرارت از شعله به محیط اطراف دارد. دو محصول عمده در فرآیندهای احتراق سوخت های فسیلی، گازهای دی اکسید کربن و بخار آب می‌باشند. این دو گونه، دو جذب کننده و نشر دهنده قوی بوده که دارای ضریب پراکندگی کمی هستند [۳۲]. منواکسید کربن و متان ضریب جذب و صدور نسبتاً بالایی دارند ولی غلظت آنها در مقایسه با دی اکسید کربن و بخار آب کم می‌باشد [۱۹]. یکی دیگر از گونه های تولید شده در احتراق سوخت‌های سنگین، دوده می‌باشد. دوده معمولاً از احتراق ناقص و یا تجزیه حرارتی هیدروکربنها تولید شده و سبب رنگ زرد شعله‌ها می‌شود. در سوخته‌های مایع و جامد، ذرات کوچک خاکستر و ذرات یا قطرات سوخت نسوخته در شعله به درخشان بودن آن کمک کرده و موجب افزایش انتقال حرارت تابشی می‌شوند. ذرات جامد و دوده تولید شده در احتراق، سهم عمده در انتقال حرارت داشته، بطوریکه تحقیقات نشان می‌دهد سهم تابش دوده در احتراق سوخت های مایع حدود ۳۰٪ تا ۵۰٪ سهم کل انتقال حرارت تابشی می‌باشد. به همین دلیل صرفنظر کردن از آن می‌تواند دقت محاسبات در توزیع دما را به مقدار زیادی کاهش دهد. در بیشتر مدل‌های تابشی اثر تابش ذرات دوده بصورت تصحیح ضریب جذب-نشر گاز وارد محاسبات می‌گردد.

### ۶-۵-۵-۱ ضریب جذب-نشر گاز در جریانهای احتراقی

ضریب جذب-نشر گازهای احتراقی نقش مهمی در انتقال حرارت و توزیع دما در محفظه‌های احتراق دارد. یکی از روشهای محاسبه ضریب جذب در مخلوط گازهای احتراقی، مدل  $WSGGM^{14}$  می‌باشد [۳۳] و [۳۱]. در این مدل ضریب جذب  $a_g$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$a_g = \sum a_{E,i} k_i P \quad (28-6)$$

در این رابطه  $a_{E,i}$  ضریب وزنی نشر و  $k_i$  ضریب جذب برای گاز خاکستری  $i$  ام و  $p$  مجموع فشار جزئی همه گازهای جذب کننده است. معمولاً در احتراق سوخته‌های فسیلی اثر سایر گازهای تولید شده نسبت به گازهای  $H_2O$  و  $CO_2$  قابل چشم پوشی می‌باشد. با جایگذاری مقادیر  $a_{E,i}$  و  $k_i$ ، ضریب جذب برای  $m$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۱]:

$$a_g = -\ln(1 - \varepsilon) / s \quad (29-6)$$

$s$  در این رابطه طول مسیر بوده و با استفاده از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^I a_{\varepsilon,i}(T) [1 - \exp(-k_i P s)] \quad (30-6)$$

بدین ترتیب ضریب جذب مخلوط گازهای احتراقی محاسبه می‌گردد. برای اعمال اثر غلظت دوده بر ضریب جذب تابشی مخلوط، ضریب جذب موثر بصورت زیر تعریف می‌شود [۳۱]:

$$k_{eff} = k_{gas} + k_{soot} \quad (31-6)$$

در این رابطه  $k_{soot}$  ضریب جذب دوده می‌باشد.

مدلهای مختلفی برای محاسبه ضریب جذب دوده ارائه شده است. نتایج تئوری و آزمایشگاهی موجود [۳۴] نشان می‌دهد ضریب جذب-نشر طیفی دوده، نسبت مستقیم با کسر حجمی دوده  $f_v$  و نسبت عکس با طول موج دارد:

$$k_{s,\lambda} = \frac{B_s f_v}{\lambda} \quad (32-6)$$

$$B_s = \frac{36\pi n \kappa}{(n^2 - \kappa^2 + 2)^2 + 4n^2 \kappa^2}$$

<sup>14</sup> Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model



Dalzell and Sarofim [۲۸] مقادیر ثابتهای معادله  $B_s$  را  $n=1.57$  و  $k=0.56$  پیشنهاد نمودند که بر این اساس  $B_s=4.9$  محاسبه می شود. تابش محاسبه شده از شعله با این روش با نتایج اندازه گیری تطابق خوبی نشان می دهد [۳۴]. بر این اساس جذب-نشر از یک توده یکنواخت دوده به ضخامت  $L$  برابر است با:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \exp(-k_{s\lambda}L) \quad (۳۳-۶)$$

با ضرب این رابطه در ضریب نشر جسم سیاه پلانک  $e_{b\lambda}(T)$  در دمای  $T$  و جایگذاری برای محاسبه  $k_s$  ضریب جذب کلی توده دوده برابر است با:

$$\varepsilon_s = (1/\sigma T^4) \int_0^\infty [1 - \exp(-B_s f_v L / \lambda)] e_{b\lambda} = 1 - \frac{15}{\pi^4} \psi^3 \left( 1 + \frac{B_s f_v L T}{C_2} \right) \quad (۳۴-۶)$$

با جایگذاری مقادیر  $\Psi$  و ساده سازی روابط داریم:

$$\varepsilon_s \cong 1 - \exp(-3.6 B_s f_v L T / C_2) = 1 - \exp(-\kappa_s L) \quad (۳۵-۶)$$

و در نهایت ضریب جذب-نشر دوده برابر است با:

$$k_s = 3.6 B_s f_v T / C_2 = 1225 f_v T (\text{m}^{-1}) \quad (۳۶-۶)$$

با محاسبه ضریب جذب دوده، ضریب جذب گاز  $k_g$  تصحیح و اثر تابش دوده در آن اصلاح می شود.

## ۶-۶ آلاینده‌های اکسید ازت

اثر سو زیست محیطی اکسیدهای ازت که از محصولات احتراق می باشند، در نیمه دوم قرن بیستم آشکار شده است. اکسیدهای ازت که  $\text{NO}_x$  نامیده می شوند، در واکنش زنجیره ای حذف ازن از استراتوسفر، شرکت می کنند. در نتیجه، مینیمم کردن  $\text{NO}_x$  از مهمترین موضوعات در احتراق است [۳۴]. انجام این امر از طریق فهم بیشتر سازو کارهای سنتیک شیمیایی اساسی که  $\text{NO}_x$  را تولید میکنند و درک بر هم کنش سنتیک شیمیایی و دینامیک سیالات بوده و ادامه دارد.

از بین ۷ اکسید مختلف ازت، آنچه در آلودگی هوا اهمیت دارد  $\text{NO}$  و  $\text{NO}_2$  از نظر سلامت انسان و  $\text{N}_2\text{O}$  به عنوان گاز گلخانه در گرمایش زمین می باشند.  $\text{NO}$  گاز بی رنگ و بی بو در حالیکه  $\text{NO}_2$  گاز بیست قرمز متمایل به نارنجی نزدیک به قهوه ای دارای نقطه جوش  $21/2$  درجه سلسیوس و فشار جزئی کم که آن را در حالت گازی نگه می دارد. این گاز خورنده اکسیدان قوی و از نظر فیزیولوژیکی محرک

مجارى تنفسى و سمى است، سمیت آن چندین برابر NO می‌باشد. NO<sub>x</sub> ابتدا به صورت NO در جریان احتراق از ترکیب ازت و اکسیژن هوا در درجه حرارت بالا و بخصوص در موتورهای احتراق داخلی تشکیل می‌گردد و پس از ورود به هوا به سرعت تبدیل به NO<sub>2</sub> می‌شود. قسمت اعظم اکسیدهای ازت NO می‌باشد [۳۵]، بنابراین کار مدلسازی در مورد NO از اهمیت خاصی برخوردار است. آلاینده‌های اکسید نیتروژن بطور عمده از چهار طریق زیر ممکن است تولید شوند [۳۶].

۱- NO<sub>x</sub> حرارتی

۲- NO<sub>x</sub> لحظه ای یا فوری

۳- NO<sub>x</sub> سوختی

۴- تولید NO از طریق منواکسید دی نیتروژن

NO<sub>x</sub> حرارتی از واکنش اکسیژن با نیتروژن موجود در هوا حاصل می‌شود. زیرا در مناطق دمای بالای شعله (بیش از ۱۸۰۰ کلوین) ترکیبات مستقیم نیتروژن با هوا حاصل می‌شود و مقدار آن به دما و نسبت سوخت به هوا بستگی دارد. در دمای کمتر از ۱۸۰۰ کلوین مقدار آن ناچیز است.

در دمای ۱۸۰۰ درجه کلوین تولید اکسید ازت از نیتروژن هوا به وسیله سازوکار فوری (پرامت) تولید می‌شود. در این سازوکار بجای اینکه نیتروژن هوا مستقیماً با اکسیژن هوا ترکیب شود ابتدا با مواد حاصل از شکستن ملکول هیدروکربنی ترکیب می‌شود تا مولکول CN و HCN را بدهد، سپس مولکول CN با اکسیژن تولید NO می‌کند.

اگر NO<sub>x</sub> از نیتروژن موجود در سوخت تولید شود به آن NO<sub>x</sub> سوختی می‌گوییم که به دما بستگی ندارد، بلکه به مقدار تماس اکسیژن و سوخت وابسته است. سازوکار تولید NO<sub>x</sub> بسیار پیچیده‌تر از دو سازوکار فوق است.

#### ۱-۶-۶ اثرات سوء ناشی از آلاینده NO<sub>x</sub>

۱) افزایش مت هموگلوبین: میزان مت هموگلوبین در خون بطور طبیعی بین صفر تا ۸ درصد هموگلوبین است وقتی در اثر تماس در محیط آلوده غلظت آن در خون به ۱۰ تا ۱۵ درصد هموگلوبین برسد (این

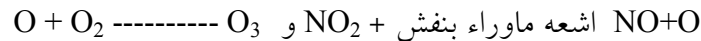
غلظت در هوای آزاد بدست نمی‌آید) علائمی مانند تنگ نفس کوششی (exertional dyspnea) که به نارسایی اکسیژن و یا هیپوکسی با افزایش مت هموگلوبین منجر می‌شود (۱۵۰۰-۱۲۰۰ پی پی ام، NO<sub>2</sub>). البته غلظت بالاتر که منجر به سیانوز و مرگ در حیوانات بوده، مشاهده شده است.

۲) بازدارندگی فعالیت آنزیم: غلظت ۲۰ پی پی ام NO باعث توقف فعالیت هیدروژناز باکتری پروتئوس و لگاریس شده است.

۳) اثرات مجاری تنفسی تغییرات در فعالیت ریه‌ها: تماس با غلظت تا ۵۰ پی پی ام در کوتاه مدت یا غلظت‌های کم (۰/۸ PPM) در مدت طولانی تر با افزایش تعداد تنفس و کاهش ظرفیت ریه‌ها همراه بوده است.

#### ۶-۶-۲ چرخه اوزن و اسماگ فوتوشیمیایی

اثر غیر مستقیم اکسیدهای ازت را می‌توان تولید ترکیبات فوتوشیمیایی اوزن و اسماگ دانست:



و این اوزن علاوه بر اثرات بهداشتی که دارد در حضور رادیکال‌های OH و هیدروکربورها وارد یک سری واکنش‌های زنجیره ای می‌شود که حاصل آن تولید آلاینده جدیدی بنام پراکسی استیل نترات (PAN) می‌باشد.

#### ۶-۶-۳ منابع تولید NO<sub>x</sub>

منبع تولید NO<sub>x</sub> همانطور که اشاره شد عمدتاً با ترکیب ازت و اکسیژن هوا در شرایط دمایی بالا (حدود ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد) انجام می‌گیرد. در شهرها مهمترین منبع انتشار آن حمل و نقل شهری است و در صنایع عمدتاً نیروگاه‌ها، اعم از نفت سوز یا گازسوز و صناعی که به نحوی با ترکیبات ازت سروکار دارند مثل تولید اسید نیتریک می‌باشد. علاوه بر منابع انسان ساخت اکسیدهای ازت توسط باکتریها، آتش فشان‌ها، رعد و برق نیز تولید می‌گردد. روند تغییرات دی اکسید ازت در تهران و در سال ۱۳۷۵ بین ۱۰/۲ تا ۸۶/۴ پی پی بی بوده است [۷]. در جدول ۶-۳ استانداردهای برخی از آلاینده‌های موجود در هوای آزاد ارائه شده اند [۳۷].

جدول ۶-۳. استانداردهای هوای آزاد به صورت راهنما برای اروپا (۱۷)

میانگین زمان	غلظت	نوع ترکیب
۱۵ دقیقه	۱۰۰ میلی گرم در متر مکعب	مونوکسید کربن
۳۰ دقیقه	۶۰ میلی گرم در متر مکعب	
۱ ساعت	۳۰ میلی گرم در متر مکعب	
۸ ساعت	۱۰ میلی گرم در متر مکعب	
۸ ساعت	۱۲۰ میکروگرم در متر مکعب	اوزن
۱ ساعت	۲۰۰ میکروگرم در متر مکعب	دی اکسید ازت
سالانه	۴۰ میکروگرم در متر مکعب	
۱۰ دقیقه	۵۰۰ میکروگرم در متر مکعب	دی اکسید گوگرد
۲۴ ساعت	۱۲۵ میکروگرم در متر مکعب	
سالانه	۵۰ میکروگرم در متر مکعب	
۲۴ ساعته	۱۵۰	ذرات ۱۰ PM
سالانه	۵۰	
UR/Lifetime	$6 \times 10^{-6}$ میکروگرم در متر مکعب	بنزن

### ۶-۶-۴ مکانیزم های تشکیل $NO_x$

فرآیندهای مربوط به تشکیل و کاهش  $NO_x$  بسیار پیچیده هستند و مدل سازی جامع آنها در سیستم های احتراقی نیازمند شبیه سازی دینامیک سیال مغشوش و سینتیک های شیمیایی می باشد. صدها واکنش اولیه جهت توصیف کامل واکنش  $NO_x$  در سیستم های احتراقی مورد نیاز است. کوپل میدان جریان مغشوش با تعداد زیادی واکنش در عمل شدنی نیست، در نتیجه از واکنش های کلی یا مکانیزم های کاهش یافته در کدهای احتراقی جامع استفاده می شود. به طور عمده سه مکانیزم برای تولید  $NO_x$  در احتراق سوخت های گازی مطرح می باشد: مکانیزم گرمایی، مکانیزم فوری و  $N_2O$  واسطه ای و مکانیزم سوخت. مکانیزم گرمایی مهمترین مکانیزمی است که تاکنون شناخته شده است. این مکانیزم برای اولین بار توسط زلدوویچ در سال ۱۹۴۶ مطرح شد. دما و غلظت بالای اکسیژن از عوامل مهم در این مکانیزم هستند و تقریباً

دراکثر فرآیندهای احتراقی مطرح می باشد. این مکانیزم توسط سه واکنش اساسی ذیل، تحت عنوان مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته بیان می گردد.



تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مولکول نیتروژن  $N_2$  نیازمند شکسته شدن پیوند قوی بین اتم های نیتروژن است و همین امر موجب وابستگی شدید این مکانیزم به درجه حرارت می گردد. واکنش (۱) دارای انرژی اکتیواسیون بالایی می باشد و عامل محدود کننده نرخ واکنش در مکانیزم زلدوویچ است. واکنش (۲) نیز تحت شرایط پر سوخت و نزدیک نواحی استوکیو متریک مهم می باشد. NO سوخت به وسیله اکسیداسیون ترکیبات نیتروژن دار سوخت در ناحیه شعله تشکیل می شود و تولید آن وقتی که حجم نیتروژن در سوخت بیش از ۰/۱ وزن سوخت باشد چشم گیر است. مکانیزم NO سوخت با تجزیه مولکول سوخت در ناحیه شعله به شکل زیر آغاز می شود.



یا



مکانیزم NO فوری در سال ۱۹۷۱ توسط فنیمور مطرح گردید. این مکانیزم در اثر برخورد بین مولکول های نیتروژن و رادیکال های هیدروکربن به وجود می آید و بنابراین در احتراق سوخت های هیدروکربنی مطرح می باشد. تشکیل این اکسید اساساً به غلظت رادیکال در ناحیه اول شعله وابسته است. برای شعله های اکسید شده (احتراق با اکسیژن اضافی)، سهم ناچیزی دارد، در صورتی که در مخلوط های غنی و دمای پایین سهم آن ممکن است به ۲۵ درصد کل اکسیدهای نیتریک برسد. واکنش های اصلی مولکول نیتروژن با رادیکال هیدروکربن عبارتند از:

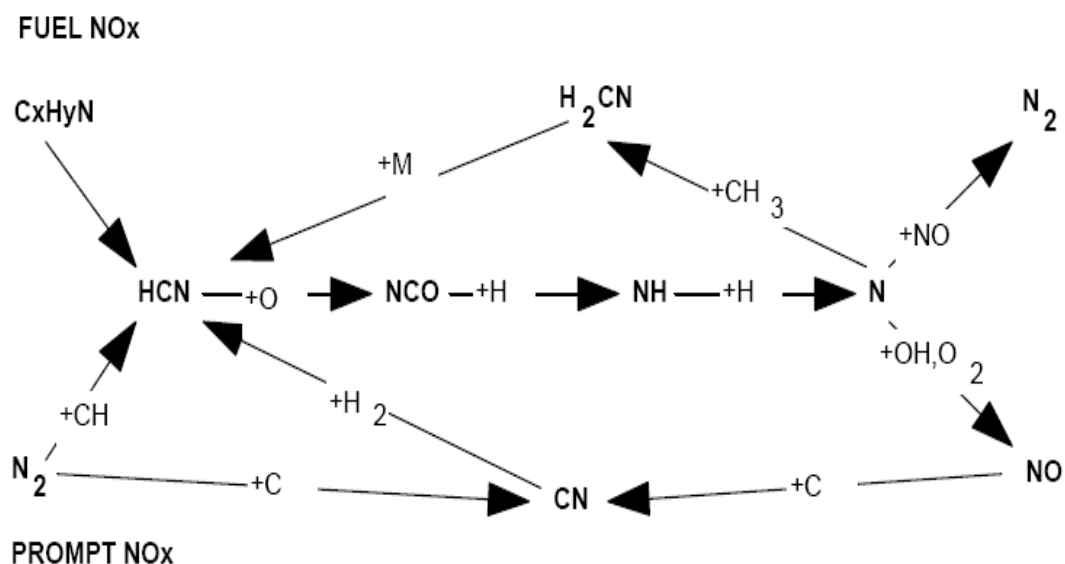


و



مکانیزم های تشکیل NOx فوری و NOx سوخت، پس از واکنش های راه اندازی به طور یکسان پیش می روند. مراحل اصلی این دو مکانیزم در شکل یک نشان داده شده است.

مکانیزم  $N_2O$  واسطه ای نیز در سال ۱۹۷۰ مطرح گردید. این مکانیزم تحت شرایط احتراقی خاصی در دمای پایین و فشارهای بالا مطرح می باشد و از اهمیت کمتری نسبت به مکانیزم های گرمایی و فوری برخوردار است. واکنش های مربوط به این فرآیندها نسبت به واکنش سایر گونه های مهم شیمیایی نسبتاً کند می باشد و بنابراین عبارات نرخ سینتیکی بایستی جهت مدلسازی این فرآیندها به کار برده شوند.



شکل ۱ - مراحل تشکیل NOx فوری و NOx سوختی

### ۵-۶-۶ تکنیک های کنترل و کاهش NOx

اساساً سه سیستم برای کاهش آلودگی مطرح می شود:

۱. سیستم پیش گیرانه، کارکردن بر روی ترکیبات سوخت قبل از اینکه به عنوان واکنش دهنده در احتراق مورد استفاده قرار گیرد و تلاش برای کاهش آلاینده های اصلی.
۲. سیستم اولیه، کارکردن بر روی پروسه احتراق و تجهیزات احتراق (مانند مشعل)، بنابراین احتراق تحت بهترین شرایط رخ می دهد و تشکیل آلاینده ها کاهش می یابد.

۳. سیستم ثانویه، کارکردن بر روی گازهای حاصل از احتراق و تفکیک و انحلال ذرات آلاینده قبل از اینکه در هوا منتشر شوند.

در این بخش یک مرور کلی از روشهای کنترل کاهش انتشار  $NO_x$  از کوره های صنعتی سوخت گازی و مایع ارائه شده است. اغلب روش های کنترل  $NO_x$  در یکی از چهار روش زیر طبقه بندی می شود: تعویض سوخت به سوختی با پیوندهای نیتروژن کمتر.

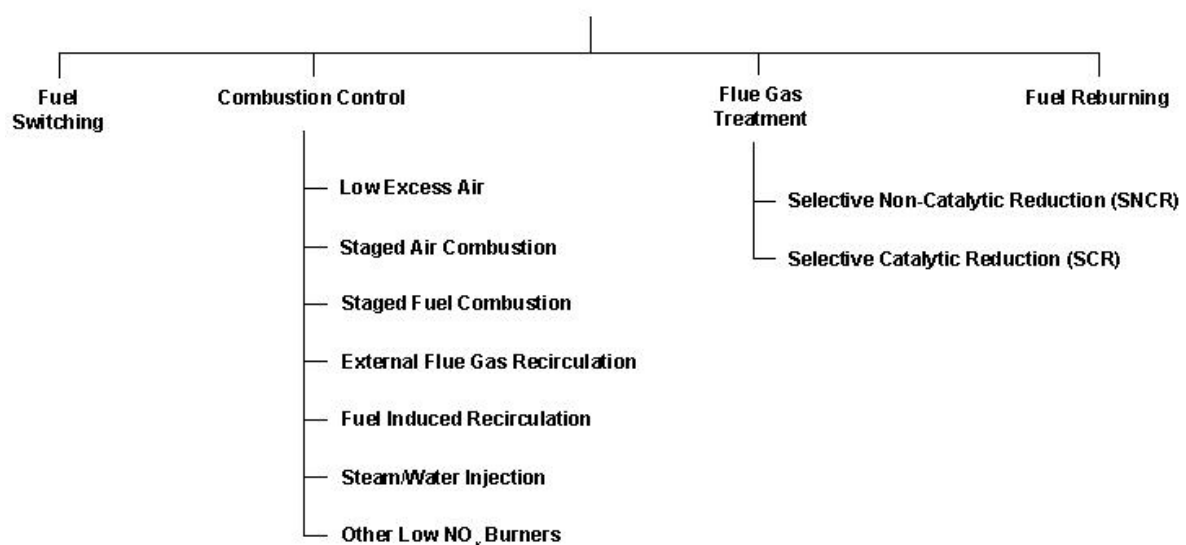
تکنیکهای کنترل پروسه احتراق، که از جمله می توان به کاهش هوای اضافی، احتراق مرحله ای، تزریق آب/ بخار و بازچرخش جریان گاز (FGR) اشاره کرد.

تکنیک های اصلاحی بر روی جریان گاز خروجی که شامل استفاده از مبدل های کاتالیستی SCR و یا SNCR می باشد.

بازسوزش سوخت، که شامل تزریق گاز طبیعی پس از احتراق سوخت اولیه می باشد و به طور معمول در بویلرهای بزرگ سوخت مایع و یا ذغال سنگ مورد استفاده قرار می گیرد.

در شکل ۴ خلاصه ای از روش های اصلی کنترل  $NO_x$  ارائه شده است. و در ادامه توضیحات بیشتری در مورد هر یک از روش های کاهش اکسید های نیتروژن بیان شده است.

#### Major $NO_x$ Reduction Techniques



شکل ۶-۴. روشهای اصلی کاهش  $NO_x$

### ۶-۶-۵-۱ تعویض سوخت

میزان نیتروژن موجود در سوخت های مایع سبک در حدود  $0.06\%$  درصد است. اما میزان نیتروژن سوخت های روغنی غلیظ به  $1/21$  درصد نیز می رسد. درحالی که میزان نیتروژن موجود در متان تقریباً صفر است. با استفاده از سوخت های با درصد نیتروژن ناچیز می توان انتشار  $NO_x$  سوختی را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

### ۶-۶-۵-۲ تکنیک های کنترل احتراق

روشهای کنترل احتراق، تشکیل اکسیدهای نیتروژن را در طول فرآیند احتراق با کنترل درجه حرارت شعله و یا غلظت اکسیژن کاهش می دهند. این روش ها معمولاً از روش های اصلاحی بعد از احتراق مقرون به صرفه تر هستند و مکرراً در بویلرهای صنعتی استفاده می شوند.

### الف) کاهش هوای اضافی

به عنوان عامل ایمنی برای تضمین احتراق کامل، در بویلرها و کوره های صنعتی از هوای مازاد استفاده می شود. یکی از عوامل موثر در تشکیل اکسیدهای نیتروژن در یک بویلر صنعتی افزایش هوای اضافه است. سطح بالای هوای اضافی به علت افزایش اکسیژن و نیتروژن هوای ورودی به شعله، باعث افزایش تشکیل  $NO_x$  حرارتی می شود.

### ب) احتراق مرحله ای

احتراق مرحله ای شامل تغییر الگوهای جریان سوخت و هوا به منظور کاهش پیک دمای شعله و غلظت اکسیژن می باشد. این امر سبب کاهش دمای شعله و نرخ تشکیل اکسیدهای نیتروژن حرارتی کم می شود. این فن آوری در اکثر انواع بویلرها و کوره های صنعتی اجرا می شود. در مشعلهای معمول که بر اساس سیستم نفوذی کنترل می شوند، سوخت و هوا جداگانه به محفظه احتراق تزریق شده و در آنجا همزمان اختلاط و احتراق صورت می گیرد. در این صورت علاوه بر بالا بودن پیک دمایی شعله، زمان اقامت نیز بالا است که هر دو از عوامل اصلی افزایش تولید  $NO_x$  هستند. با استفاده از مشعلهای احتراق با  $NO_x$



پایین (LNB) اثر این دو عامل را می‌توان تا حد زیادی کاهش داد. با استفاده از مشعلهای LNB، با چند منطقه‌ای کردن اختلاط و در نتیجه خارج کردن احتراق از حالت استوکیومتری و تبدیل آن به احتراق چند مرحله‌ای میزان تولید NO<sub>x</sub> کاهش می‌یابد. با بکارگیری این مکانیزم شعله احتراقی پایدار با مناطق مختلف بوجود می‌آید. احتراق اولیه با حضور ۴۰-۳۰ درصد هوای استوکیومتری انجام می‌شود. سپس بازسوزش سوخت به‌مراه سوخت اضافه صورت گرفته و در نهایت احتراق با تزریق هوای تکمیلی که همزمان درجه حرارت احتراق را در محدوده مناسب نگه می‌دارد تکمیل می‌شود.

#### پ) پاشش آب / بخار

همانگونه که اشاره شد، در پروسه احتراق، با پایین آوردن دمای احتراق می‌توان تا حد زیادی از تولید ترکیبات NO<sub>x</sub> جلوگیری کرد. از دیگر روش‌های کاربردی به پاشش آب یا بخار در محفظه احتراق بعنوان عامل کاهش درجه حرارت احتراق می‌توان اشاره کرد. نسبت تزریق آب به دبی جرمی سوخت گاز ۰/۳۳ تا ۲/۵ برای رسیدن به ۲۵ppm تا ۷۵ ترکیبات NO<sub>x</sub> منتشره از دودکش و همچنین ۰/۴۶ تا ۲/۳ در مورد سوخت مایع به منظور انتشار ترکیبات اکسیدهای نیتروژن در محدوده ۴۲ppm تا ۱۱۰ لحاظ می‌شود.

#### ۳-۵-۶-۶ مبدل کاتالیزوری SCR

شامل تزریق یک ماده شیمیایی به جریان گازهای خروجی در حضور یک کاتالیست و در گستره دمای مشخص (230°C - 600°C) است. این ماده شیمیایی معمولاً آمونیاک است. NO<sub>x</sub> و NH<sub>3</sub> در سطح کاتالیزر واکنش انجام می‌دهند تا H<sub>2</sub>O و N<sub>2</sub> تولید شوند (عمل احیاء).

#### ۴-۵-۶-۶ باز سوزش سوخت

شامل تزریق گاز طبیعی بعد از احتراق اولیه سوخت می‌باشد. به طور معمول در بویلرهای بزرگ نیروگاه‌ها با سوخت زغال سنگ یا نفت کاربرد دارد. بر این اساس سه مرحله احتراق بر اساس مرحله‌ای کردن سوخت ایجاد می‌شود. در ابتدا ۱۵ درصد کل سوخت در پایین دست (ناحیه احتراق کم سوخت) تزریق می‌شود و در ناحیه بازسوزش،  $\phi \geq 1.0$  مقدار NO از طریق واکنش‌هایی با هیدروکربن‌ها و گونه

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: معادلات و تئوری آلاینده‌ها



های هیدروکربن های میانی مانند HCN مشابه مکانیزم فنیمور، کاهش می یابد. هوای اضافی سپس برای سوختن سوخت تامین می شود.

## **فصل هفتم:**

### **اعتبار سازی حل عددی فلر با نتایج آزمایشگاهی موجود**

## ۱-۷ مقدمه

جهت بررسی دقت حل عددی و اعتبار سنجی فلر، بدلیل کمبود نتایج اندازه گیری شده و مشکلات زیاد کارهای آزمایشگاهی بر روی فلر واقعی، از نتایج اندازه گیری شده در دانشگاه آلبرتا که بر روی یک فلر آزمایشگاهی انجام شده، استفاده شده است. در زیر به شرح ابعاد و مدل های مورد استفاده، پرداخته شده است.

## ۲-۷ تشریح مراحل حل

### ۱-۲-۷ شناخت دقیق مسئله و در نظر گرفتن فرضیات ضروری موثر بر دقت

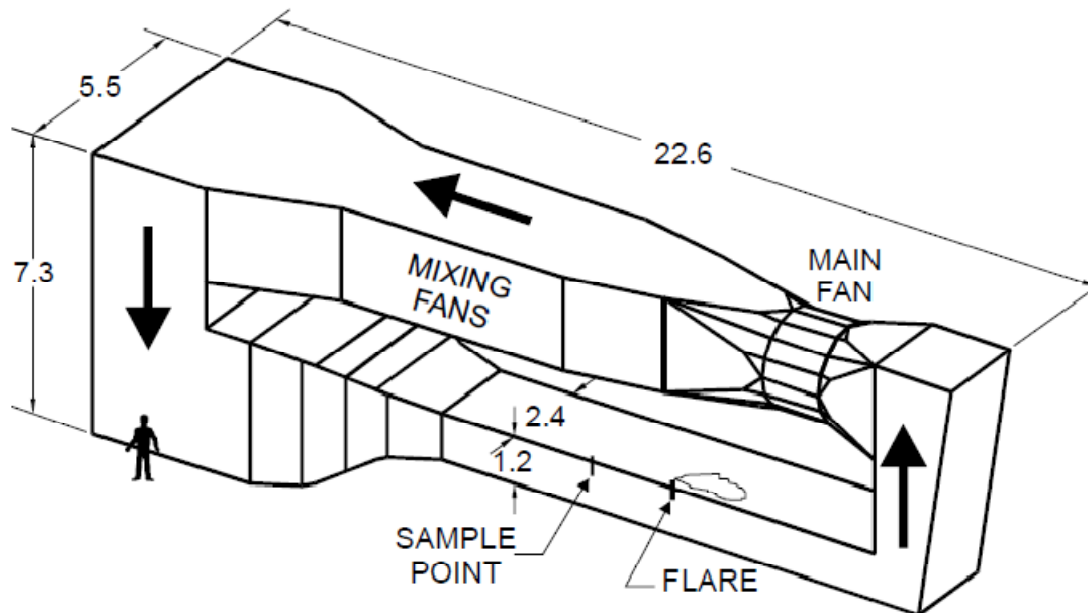
ماهیت مسأله، پایدار در یک هندسه سه بعدی و با در نظر گرفتن جریان توربولنس در حالت تک فاز فرض می شود.

حوزه فیزیکی مورد بحث مربوط به یک فلر نمونه می باشد که در تونل باد قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی که در فصل بعد ارائه می شود، حاصل کار محققان دانشگاه آلبرتا کانادا (جانستون و همکاران) است که شماتیک تونل باد مورد استفاده آنها در شکل (۴-۳) ارائه شده است. ابعاد مشخص شده در این شکل به متر می باشد.

### ۲-۲-۷ مشخصات تونل باد

حجم داخلی تونل باد تقریباً ۳۵۰ متر مکعب بوده و سرعت جریان باد ایجاد شده توسط موتور D.C با توان اسب بخار، می تواند از ۰/۲ تا ۳۵ متر بر ثانیه تغییر کند. سطح مقطع بخش آزمایش تونل به ابعاد ۱/۲۲ متر در ارتفاع و ۲/۴۴ متر در پهنا است و دارای جریان یکنواخت می باشد. سرعت جریان باد توسط یک لوله پیتوت اندازه گیری می شود. تونل دارای یک فن اصلی و دو فن فرعی بوده که در قسمت بالایی آن واقع شده و مسئولیت مخلوط کردن کامل دود محصولات و هوای تونل را قبل از رسیدن هوا به نقطه نمونه برداری بر عهده دارد. فلر شبیه سازی شده به عنوان بخشی از این کار، یک لوله دایروی با قطر اسمی ۲۵ میلیمتر (قطر داخلی ۲۲/۱ میلیمتر و قطر خارجی ۲۴/۷ میلیمتر) بوده که به طول ۴۷ سانتیمتر و به صورت عمود در تونل باد امتداد یافته است، به طوریکه جریان هوای ورودی بر آن عمود است. یک

تولید کننده اغتشاش که از یک صفحه سوراخ شده (سوراخهایی با قطر سه میلیمتر) تشکیل شده است نیز در خروجی جت سوخت بر روی نصف بدنه فلر نصب شده است.



شکل ۱-۷ شماتیک تونل باد دانشگاه آلبرتا

ترکیب سوخت مورد استفاده در جدول ۱-۴ آمده است:

جدول ۱-۷ ترکیب سوخت مورد استفاده

گونه	درصد مولی
	۹۵.۳
	۲.۲
	۰.۸
	۱.۷

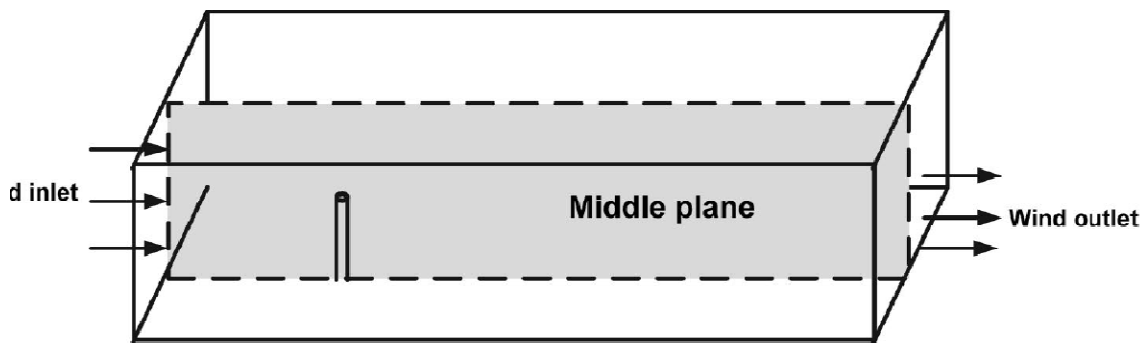
به منظور تضمین احتراق، از یک شعله دیفیوژن جت هیدروژنی که قبلاً با استفاده از سیستم جرقه ولتاژ بالای دستی مشتعل شده است، استفاده می‌شود. بعد از اینکه یک بار شعله هیدروژن به درستی در مکان مناسب قرار گرفت، سیستم دستی هیدروژن دور خواهد شد. از آنجایی که شعله فلر واقعی همواره در معرض سرعت‌های مختلف جریان قرار می‌گیرد. برای این منظور سرعت جریان سوخت ثابت و برابر در نظر گرفته می‌شود و تأثیر سرعت ورودی تونل باد به عنوان مهمترین متغیر بر شکل،

موقعیت و راندمان فلر مورد بررسی قرار می گیرد. حالت های مختلف سرعت جریان باد در جدول ۴-۲ معرفی شده است.

جدول ۲-۷ شرایط مختلف آزمایش

سرعت هوا (m/s)	حالت
۱/۳۳	<b>B</b>
۲/۷۶	<b>C</b>
۴/۰۹	<b>D</b>
۵/۴۹	<b>E</b>
۸/۲۳	<b>F</b>
۱۱/۰۵	<b>G</b>

اما از نظر شبیه سازی، تنها، بخش تست اطراف مشعل (یعنی مکعبی حول فلر) مهم است [۶]. ابعاد این مکعب ۲/۴۴ متر در پهنا، ۱/۲۲ در ارتفاع و ۱/۸ متر در طول است، اما یک مکعب با طول ۵ متر برای ارائه مشخصات شعله کافی است. برای تولید هندسه و مش بندی مدل که در شکل ۴-۴ آمده است، از نرم افزار گمبیت استفاده شده است.



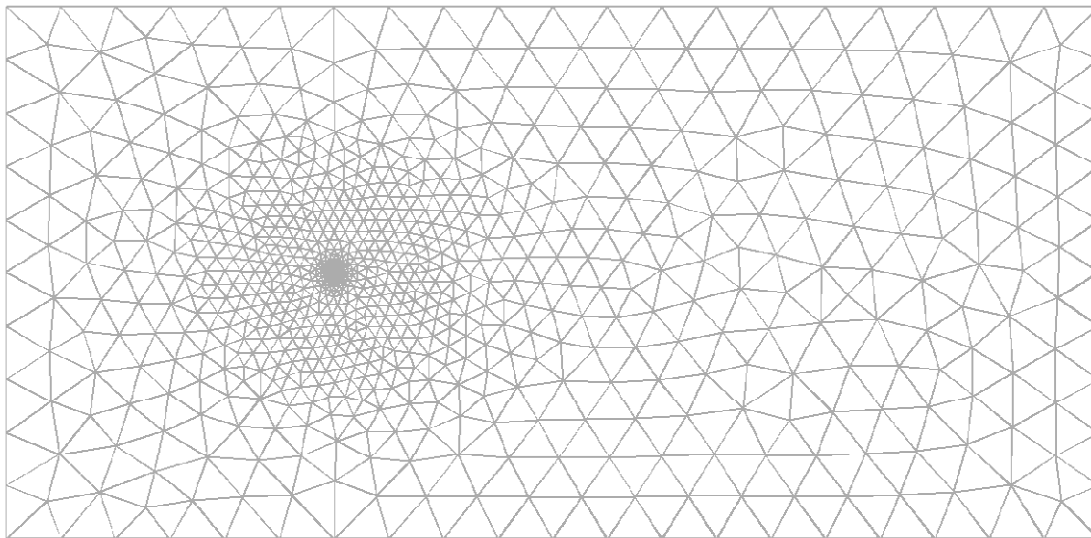
شکل ۲-۷ هندسه مدل شده

لازم به ذکر است نتایج توزیع دما و سرعت روی صفحه میانی نشان داده شده در شکل بالا (Middle Plane) استفاده شده است.

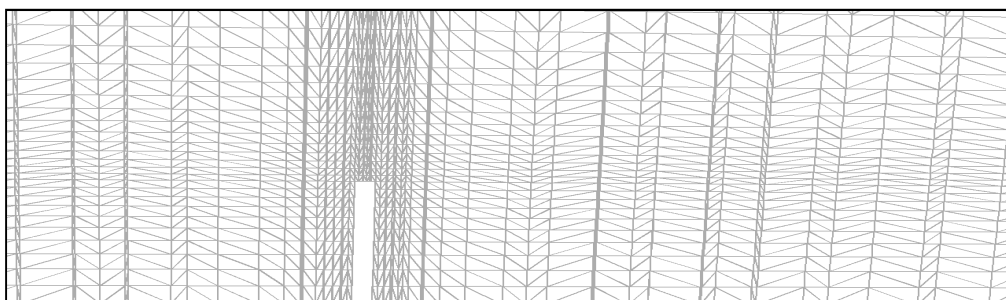
۳-۲-۷ تولید شبکه

پس از ایجاد مدل، به تولید شبکه برای آن پرداخته می شود. نرم افزار گمبیت قابلیت تولید هندسه، مش بندی محیط حل، اعمال نوع شرایط مرزی و ذخیره و تبدیل این اطلاعات به فرمت مورد نیاز نرم افزار Fluent را دارا می باشد. این نرم افزار با قابلیت تولید انواع مش بندی ۴ وجهی، ۶ وجهی منتظم و غیر منتظم یکی از نرم افزارهای قوی در این زمینه می باشد.

از آنجایی که ابعاد فلر در مقایسه با ابعاد تونل بسیار کوچک است و با توجه با اهمیت شبکه بندی اطراف فلر لازم است تا از شبکه بندی ریزتری در اطراف فلر استفاده شود. برای این منظور از سه استوانه با قطرهای بزرگتر از قطر دهانه فلر که در اطراف فلر در نظر گرفته می شوند، استفاده خواهد شد. پس از این کار شبکه حاصل مانند شکل ۳-۷ و ۴-۷ خواهد بود.



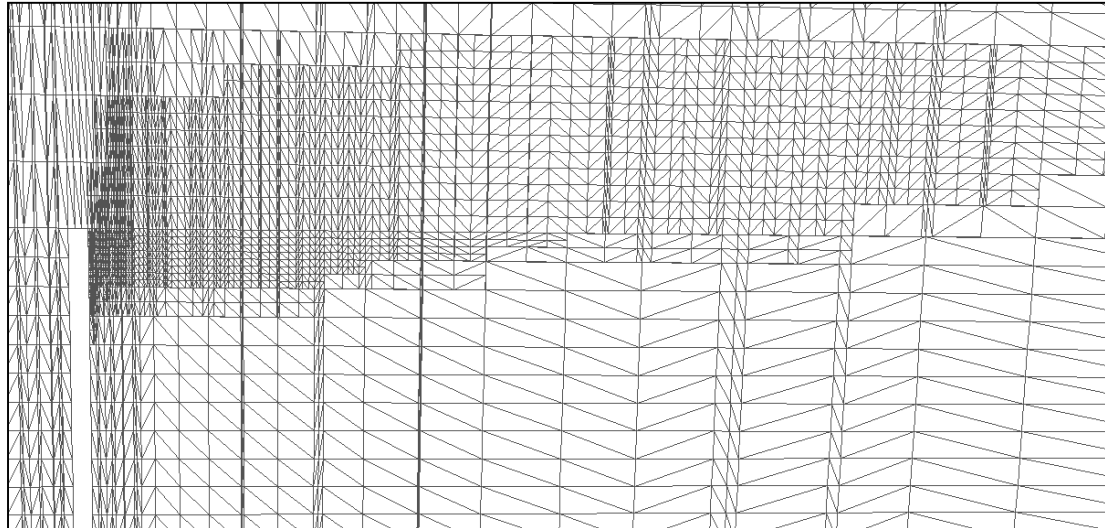
شکل ۳-۷ شبکه حل از نمای بالا



شکل ۴-۷ شبکه حل از نمای جانبی

به منظور افزایش دقت جوابها در نقاط مهم شبکه و جلوگیری از افزایش شدید زمان محاسبات، پس از حل اولیه میدان جریان و احتراق، نواحی با دمای بالا (نقاطی که دمای محیط حل ۲۰ درجه

سلسیوس بیش از دمای محیط است) تا ۴ برابر ابعاد شبکه ریزتر شده است، که در شکل ۷-۵ مشاهده می-شود.



شکل ۷-۵ شبکه ریزتر شده در ناحیه شعله در فلونت

در مجموع برای شبیه سازی مدل مورد نظر، در بیش از یک میلیون شبکه ۴ وجهی استفاده شده است.

#### ۷-۲-۴ شرایط مرزی

در کار حاضر، شرایط مرزی تعریف شده در فلونت در جدول ۳-۴ ذکر شده است.

جدول ۷-۳ شرایط مرزی

نام قسمت	نوع شرط مرزی
دیواره فلر	Wall
دیواره تونل باد	Wall
ورودی تونل باد	Velocity Inlet
خروجی تونل باد	Pressure Outlet
ورودی جت گاز	Velocity Inlet

#### ۷-۲-۵ تعیین مدل حل

پس از انتقال اطلاعات لازم به نرم افزار Fluent با تنظیم مدل حل، اعمال مقادیر شرایط مرزی می توان مساله را حل نمود؛ فلونت بوسیله حل معادلات بقا جرم، اندازه حرکت، انرژی و اجزا شیمیایی با



استفاده از روش عددی حجم محدود، بر پایه مجزاسازی، این مسایل را مدل سازی می کند. بر اساس تنظیمات زیر ( که جزییات آن در فصل های قبل توضیح داده شده است)، نتایج در بخش بعد مورد بررسی قرار می گیرد:

**Solver Adjustments:**

Pressure Based Solver,  
3D Space,  
Implicit Formulation,  
Steady Time

**Viscous Model:**

RSM  
Standard wall function

**Species Model:**

Non Premixed Model (PDF)

**Reactions:**

Volumetric

**Mixture Material:**

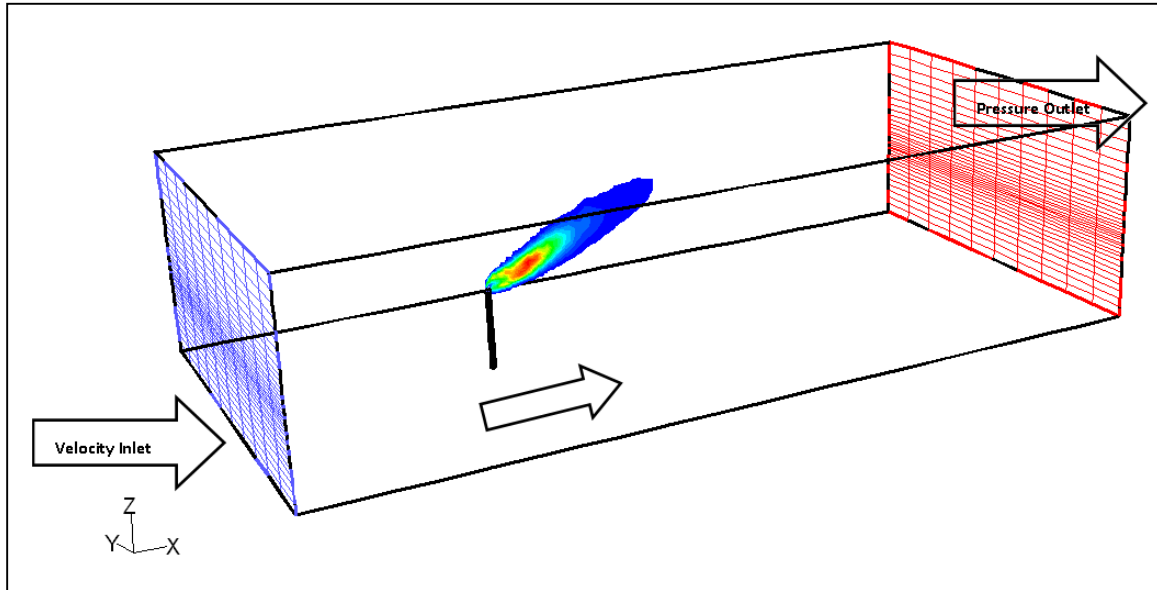
See Table 7-1

اکنون تمامی شرایط برای شروع حل آماده است. در ادامه فصل نتایج حاصل از حل عددی ارائه خواهد شد.

وزش باد یکی از عوامل موثر بر عملکرد فلرهای هوایی بوده که نقش موثری بر راندمان، تشکیل آلاینده ها، توزیع دما و تنشهای حرارتی دیواره فلر دارد. در این بخش پس از مدل کردن هندسه فلر و محیط اطراف آن به مطالعه اثر وزش باد بر عملکرد فلر پرداخته می شود. جهت بررسی صحت حل، مطالعات مورد نظر بر روی هندسه معرفی شده در مطالعات آزمایشگاهی جانسون و همکارانش [۱] انجام می شود و تحلیل فرآیند احتراق فلر و تشکیل آلاینده های دوده و NOx در سرعت های مختلف باد مورد مطالعه قرار گرفته است.

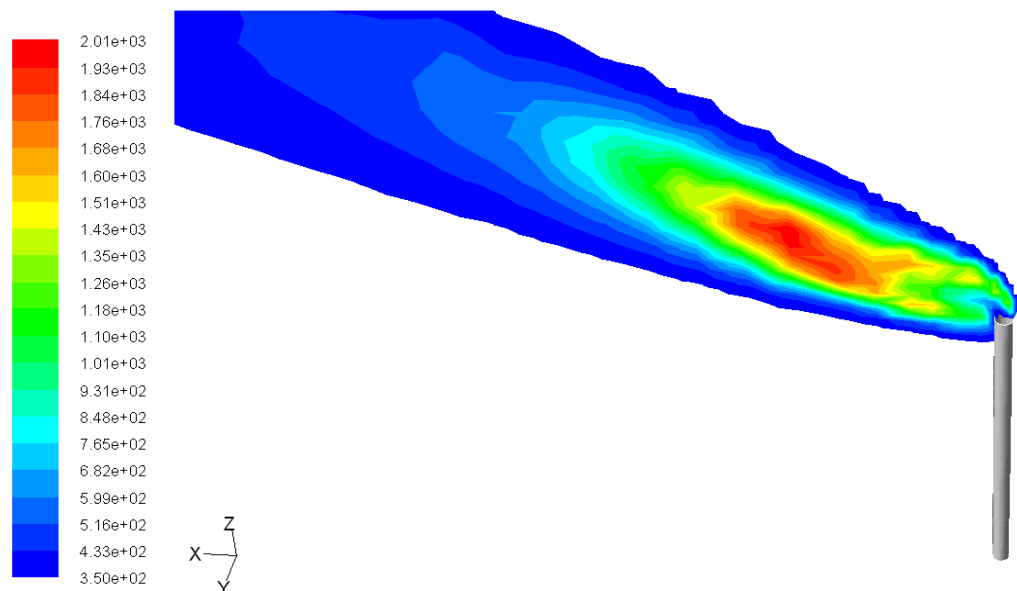
### ۳-۷ نتایج شبیه سازی فلر آزمایشگاهی دانشگاه آلبرتا

در شکل ۶-۷ شماتیک هندسه مدل شده و موقعیت فلر نشان داده شد. همانطور که مشاهده شد با توجه به کشیدن شدن شعله در جهت وزش باد و گردابه های پشت فلر، ناحیه پشت آن ۳ برابر ناحیه جلوی فلر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در این فلرها هوای احتراق از محیط اطراف تامین می شود، سرعت باد نقش مهمی بر توزیع دما، اختلاط سوخت و هوا و نرخ احتراق دارد.



شکل ۶-۷ شرایط مرزی

در شکل ۷-۷ توزیع دمای داخل شعله فلر در حالت با وزش باد (با  $1/33$  متر بر ثانیه) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود به دلیل اثرات متقابل نیروهای شناوری و وزش باد بر شعله، محور شعله از راستای قائم منحرف شده و بر حسب سرعت باد به سمت شعله افقی متمایل می گردد.



Contours of Static Temperature (k)

FLUENT 6.3 (32)

شکل ۷-۷ توزیع میدان دما در اطراف فلر

بر حسب شدت اختلاط و نرخ احتراق، گاز خروجی از فلر محترق شده و مقدار آن با دور شدن از شعله کاهش می یابد. با توجه به درصد عمده گاز های ورودی متان و اتان بوده است، در شکل های ۷-۸ و ۷-۹ توزیع این دو هیدروکربن در ناحیه شعله نشان داده شده است. مشاهده می شود با دور شدن از شعله مقدار این دو گاز بدلیل احتراق کاهش یافته و محصولات احتراق افزایش می یابند. بیشترین غلظت هیدروکربنها در دهانه ورودی بوده و بر اساس شرایط مرزی اعمال شده در مدل PDF محاسبه می گردند. از مهمترین محصولات احتراق در فلرها، گاز  $CO_2$  می باشد، که نقش مهمی در ارزیابی عملکرد و محاسبه راندمان فلر دارد. عموماً در واکنشهای احتراقی ابتدا از احتراق سوخت، گاز  $CO$  تشکیل شده و سپس در صورت وجود اکسیژن کافی، دمای بالا، اختلاط مناسب سوخت و هوا و سایر شرایط احتراق کامل گاز  $CO$  به  $CO_2$  تبدیل می گردد. در غیر اینصورت بخشی از گاز  $CO$  بدون احتراق کامل به عنوان آلاینده در محیط منتشر می گردد.

در شکل ۷-۱۰ و ۷-۱۱ توزیع کسر جرمی گازهای  $CO$  و  $CO_2$  نشان داده است. مقایسه این دو شکل نشان می دهد در نواحی نزدیک به دهانه ورودی بدلیل احتراق هیدروکربنها، غلظت  $CO$  بیشتر بوده و با دور شدن از دهانه ورودی، به دلیل تبدیل  $CO$  به  $CO_2$  غلظت آن شدیداً کاهش می یابد.



Contours of Mass fraction of ch4

FLUENT 6.3 (:

شکل ۷-۸ توزیع کسر جرمی متان



Contours of Mass fraction of c2h6

FLUENT 6.3 (

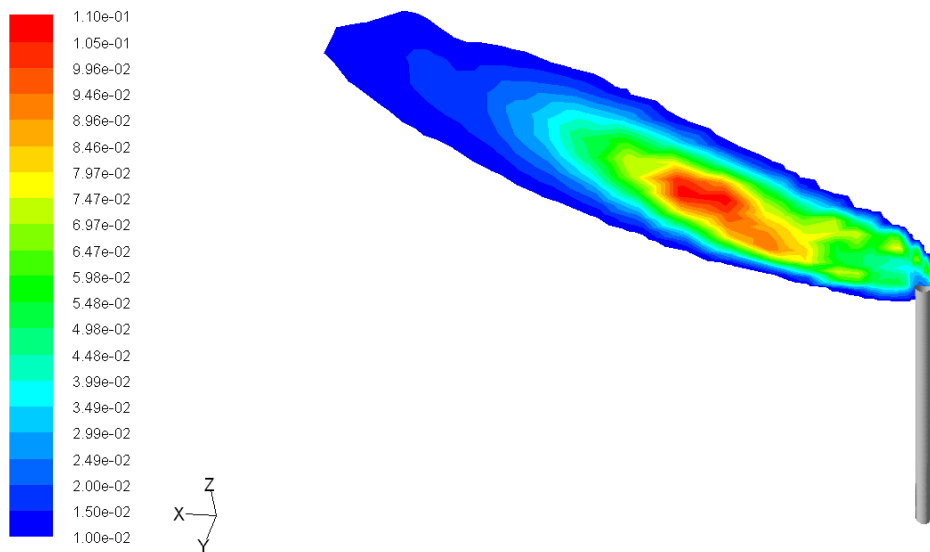
شکل ۷-۹ توزیع کسر جرمی اتان



Contours of Mass fraction of co

FLUENT 6.3

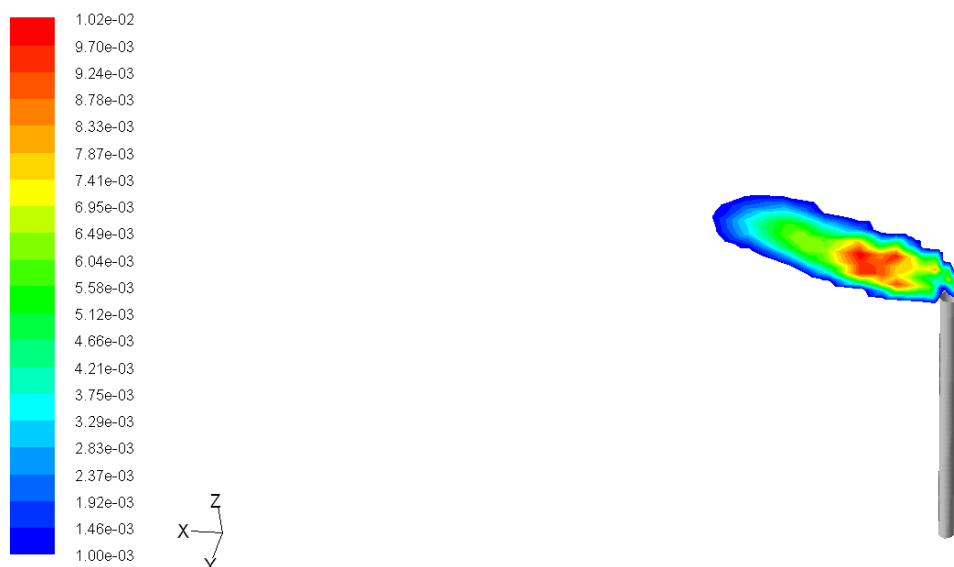
شکل ۷-۱۰ توزیع کسر جرمی مونواکسید کربن



Contours of Mass fraction of co2

FLUENT 6.3 (

شکل ۷-۱۱ توزیع کسر جرمی دی اکسیدکربن



Contours of Mass fraction of h2

FLUENT 6.3 (

شکل ۷-۱۲ توزیع کسر جرمی هیدروژن

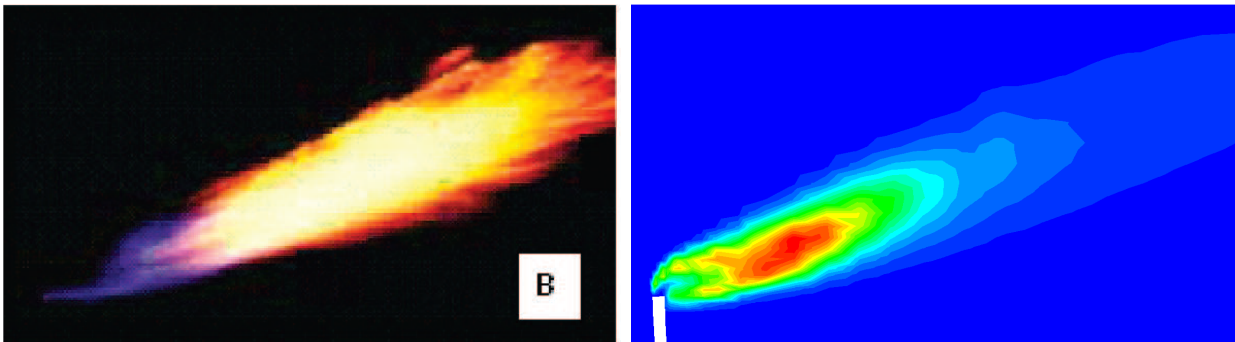
یکی از محصولات میانی احتراق هیدروکربنها، گاز هیدروژن بوده که در صورت وجود شرایط مناسب، با اکسیژن مجددا واکنش داده و تشکیل بخار آب می دهد. معمولا این گونه بیشتر از تجزیه حرارتی

سوخت هیدروکربنی در نواحی دمای بالای شعله و یا احتراق ناقص سوخت تشکیل می شود و مقدار آن نسبتاً کم می باشد.

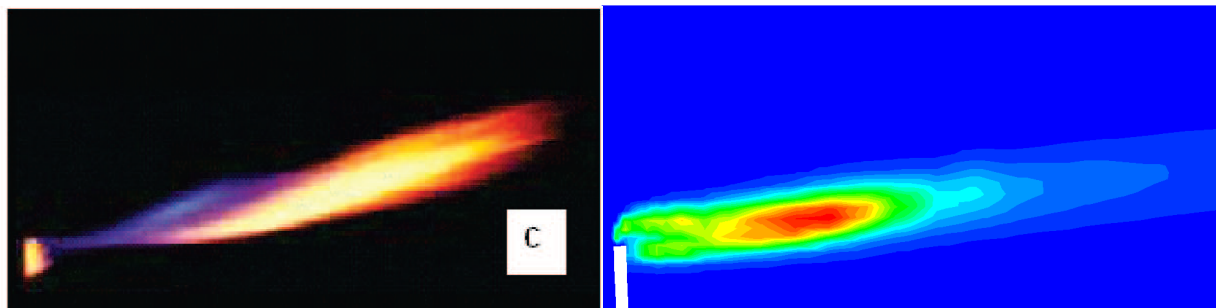
#### ۴-۷ بررسی دقت حل

با توجه به پیچیدگی فرایند احتراق فلر، جریانهای شدیداً آشفته خارجی، اثر میدان جریان بر توزیع دما انتخاب مدل حل مناسب و همچنین تعیین ابعاد مناسب شبکه از اهمیت خاصی برخوردار است. بدین منظور ابتدا شبیه سازی بر روی یک نمونه فلر آزمایشگاهی که اطلاعات جزئی مسئله و نتایج آن مشخص می باشد، انجام شده است. همچنین با بررسی مطالعات انجام شده در فصل سوم، سعی شده تا با توسعه یک مدل عددی کامل، نواقص نتایج عددی بدست آمده توسط کاستینریا و ادگار [۲۳] نیز اصلاح گردد. یکی از مهمترین پارامترهای جهت مقایسه نتایج حل، پیش بینی شکل شعله در سرعتهای مختلف باد بخصوص در سرعتهای بالا که پدیده خوابیدن شعله روی بدنه فلر اتفاق می افتد، می باشد. از آنجایی که توزیع دما تخمین خوبی از شکل شعله می باشد [۱]، در این پروژه شکل شعله واقعی با توزیع دمای محاسبه شده، مقایسه گردیده است.

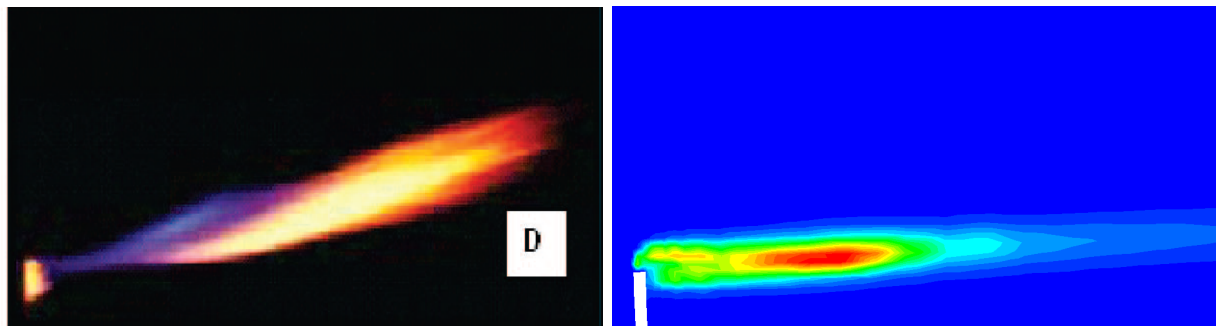
کاستیاک و همکارانش برای بررسی آزمایشگاهی شکل شعله از عکسبرداری مستقیم استفاده نمودند. بدین شعله درخشان به وجود آمده توسط یک دوربین ویدئویی دیجیتال با کیفیت تصویر ۴۸۰ × ۶۴۰ عکسبرداری می شود. لنزها و دوربین در فاصله ۲.۹ متر از خط مرکز جت نصب شده اند. سرعت شاتر (*speed shutter*)، بین — و — ثانیه متغیر است و تصاویر شعله همزمان را ذخیره کرده است. نتایج حاصل از این عکسبرداریها در سرعتهای مختلف جریان باد در شکل های ۷-۱۳ تا ۷-۱۸ با نتایج عددی مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سرعت باد، طول شعله افزایش یافته و حجم آن کاهش می یابد.



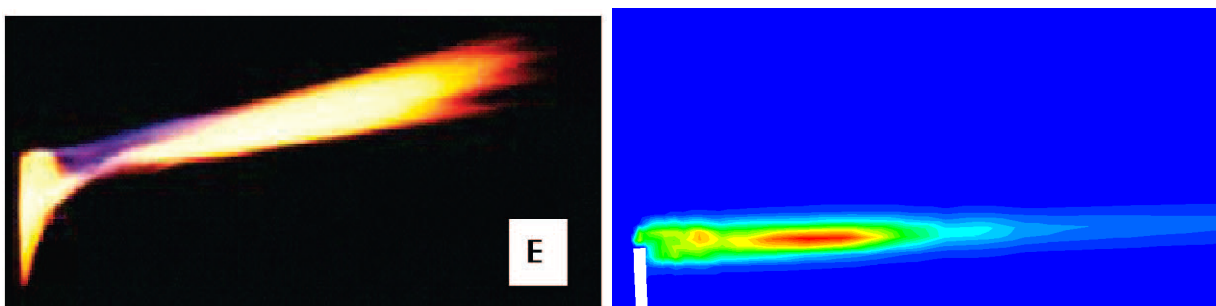
شکل ۷-۱۳ مقایسه شکل شعله بدست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی در سرعت باد



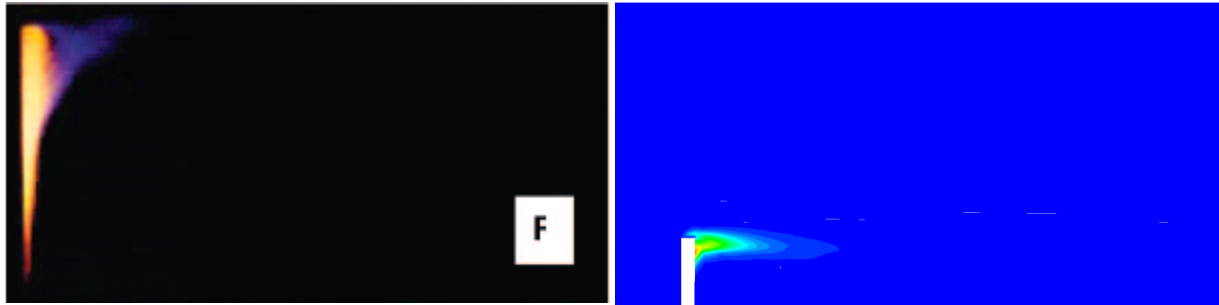
شکل ۷-۱۴ مقایسه شکل شعله بدست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی در سرعت باد



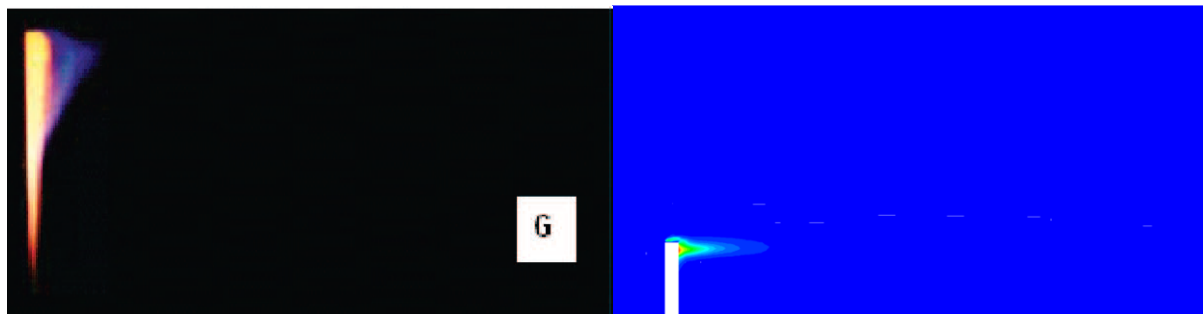
شکل ۷-۱۵ مقایسه شکل شعله بدست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی در سرعت باد



شکل ۷-۱۶ مقایسه شکل شعله بدست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی در سرعت باد



شکل ۷-۱۷ مقایسه شکل شعله بدست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی در سرعت باد



شکل ۷-۱۸ مقایسه شکل شعله بدست آمده از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی در سرعت باد

همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد با افزایش سرعت باد تا حدود ۶ متر بر ثانیه شعله به دو قسمت عمده تقسیم می‌شود. بطوریکه بخشی از شعله در پشت دیواره فلر و بخش دیگری از آن در جهت جریان تشکیل می‌گردد. همچنین در سرعتهای بالا، شعله پشت دیواره بزرگتر می‌گردد. اما با افزایش بیشتر سرعت باد، تنها شعله پشت فلر مشاهده شده و بخش دیگر به همراه جریان کنده شده و در نهایت حذف می‌گردد.

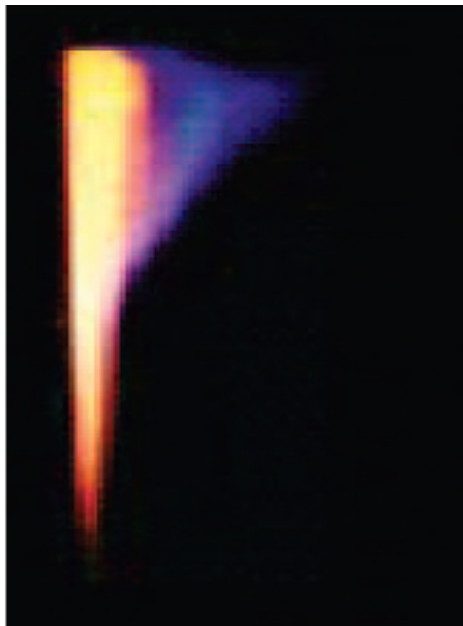
#### ۵-۷ مقایسه مدل‌های آشفته‌گی

همانطور که نتایج آزمایشگاهی و عددی در بخش قبل نشان داد، در سرعتهای بالای باد بدلیل اغتشاشات شدید جریان و جریانهای گردابی سه بعدی پشت فلر، انتخاب مدل آشفته‌گی مناسب از اهمیت خاصی در پیش‌بینی نتایج برخوردار است. در بخش به بررسی دقت مدل‌های مختلف پرداخته می‌شود. با توجه به اهمیت پیش‌بینی جریان در سرعتهای بالای باد، نتایج مدل‌های مختلف در سرعت ۱۱/۰۵ متر بر ثانیه با نتایج آزمایشگاهی ارزیابی شده است. مدل‌های مورد بررسی عبارتند از مدل‌های ، ، و ، که نتایج آنها در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل واقعی

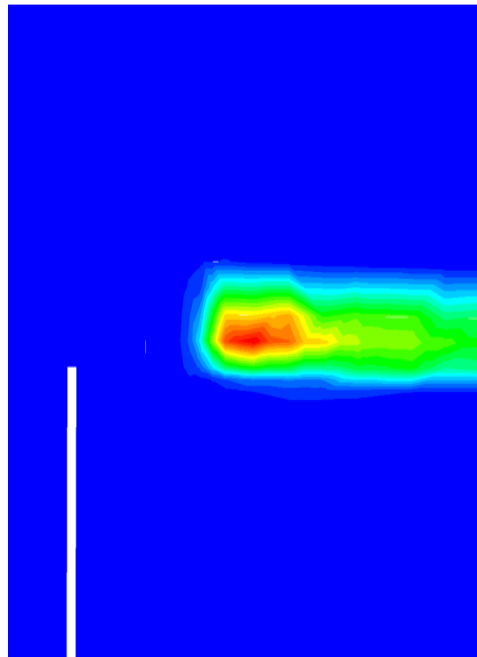


شعله در شکل ۷-۱۹ و نتایج بدست آمده از مدل‌های مختلف آشفته‌گی در شکل‌های ۷-۲۰ تا ۷-۲۱ نشان داده شده است.

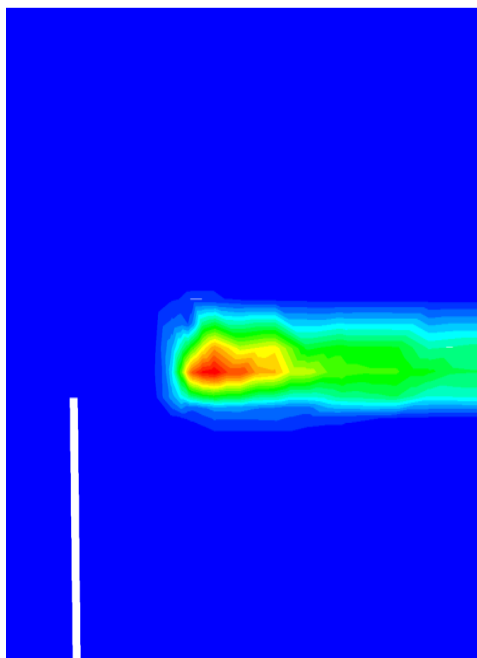
همانطور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود مدل‌های مختلف شعله را به صورت جدا شده از دهانه فلر پیشگویی می‌کنند که در تضاد با شکل واقعی شعله (شکل ۷-۱۹) می‌باشد. تنها مدلی که قادر است به درستی اندازه شعله و محل ماکزیمم دما روی بدنه فلر را پیشگویی کند، مدل تنش رینولدز (RSM) است. علت این امر را می‌توان در ناتوانی مدل‌های در پیشگویی رژیم جریان اشفته و ابعاد گردابه تشکیل شده پشت فلر دانست. در ادامه بردارهای سرعت در اطراف دهانه فلر با استفاده از مدل‌های آشفته‌گی مورد بحث بررسی خواهند شد.



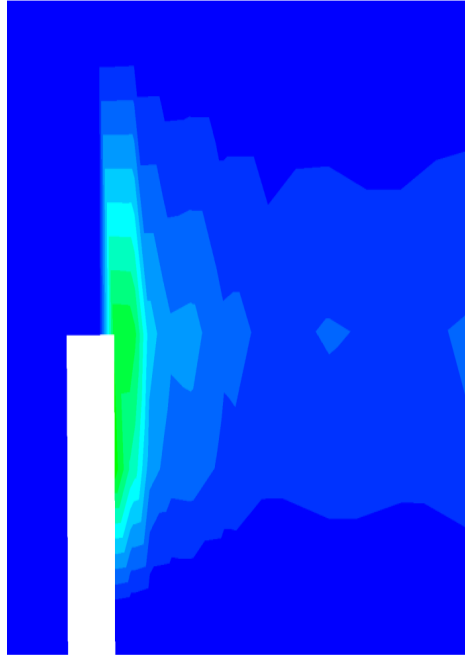
شکل ۷-۱۹ شکل واقعی شعله در سرعت  $m/s$  V



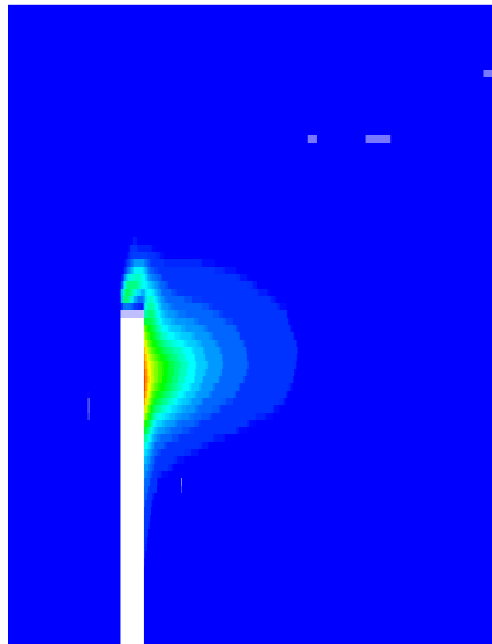
شکل ۷-۲۰ شکل شعله در مدل توربولنس در سرعت m v



شکل ۷-۲۱ شکل شعله در مدل توربولنس در سرعت



شکل ۷-۲۲ شکل شعله در مدل توربولنس در سرعت m v



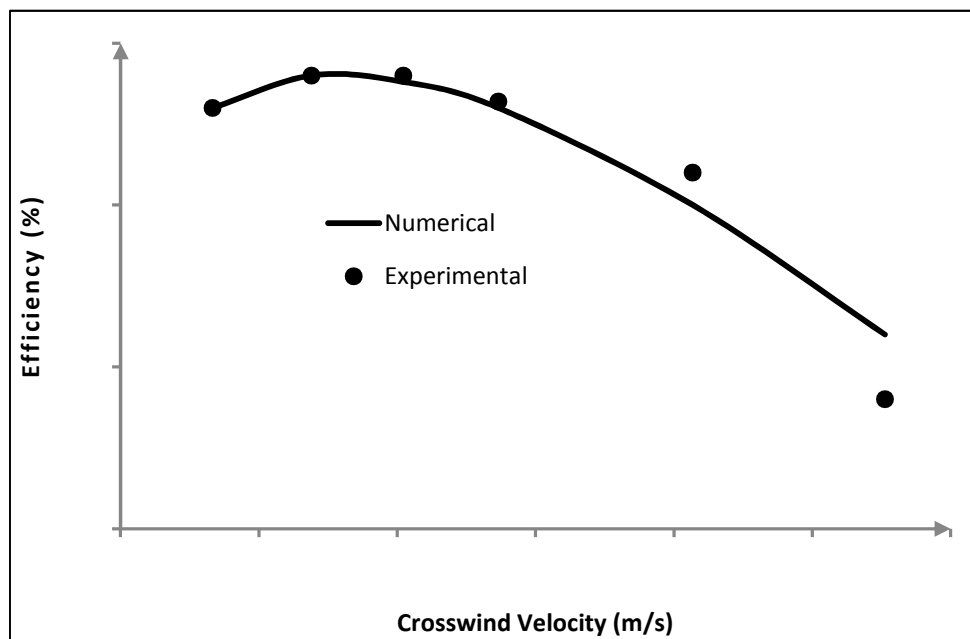
شکل ۷-۲۳ شکل شعله در مدل توربولنس در سرعت m v

## ۶-۷ راندمان احتراق

راندمان فلر بر اساس میزان تبدیل هیدروکربنهای ورودی به مقدار  $CO_2$  خروجی ارزیابی می گردد. در یک فلر با عملکرد مناسب هر چه مقدار  $CO_2$  بیشتر باشد، احتراق فلر کاملتر بوده و انتشار آلاینده های آن کمتر می باشد. قبل از اشتعال شعله تمامی غلظت های اندازه گیری شده ثابت و نشان دهنده غلظت های اولیه در تونل باد می باشد. راندمان فلر بر اساس معادله (۷-۱) تعریف شده است:

$$(۷-۱) \quad \text{دبی جرمی کربن در} \quad \frac{\text{تولید شده در محصولات احتراق}}{\text{دبی جرمی کربن در}} \quad \text{در جریان سوخت گاز}$$

در شکل ۷-۲۴ راندمان محاسبه شده از نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی (محاسبه شده بر اساس  $CO_2$  اندازه گیری شده) مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود در هر دو نمودار، با افزایش سرعت باد، ابتدا راندمان فلر افزایش یافته و پس از رسیدن به بیشترین مقدار خود در سرعت حدود ۴ متر بر ثانیه، روند نزولی می یابد. روند صعودی افزایش راندمان با افزایش سرعت باد، بدلیل اختلاط (mixing) بهتر سوخت و هوا می باشد. اما با توجه به وابستگی نرخ واکنش به پارامترهای اختلاط، دما و نسبت هم ارزی راندمان با افزایش بیشتر سرعت باد کاهش یافته و احتراق ناقص انجام می شود.

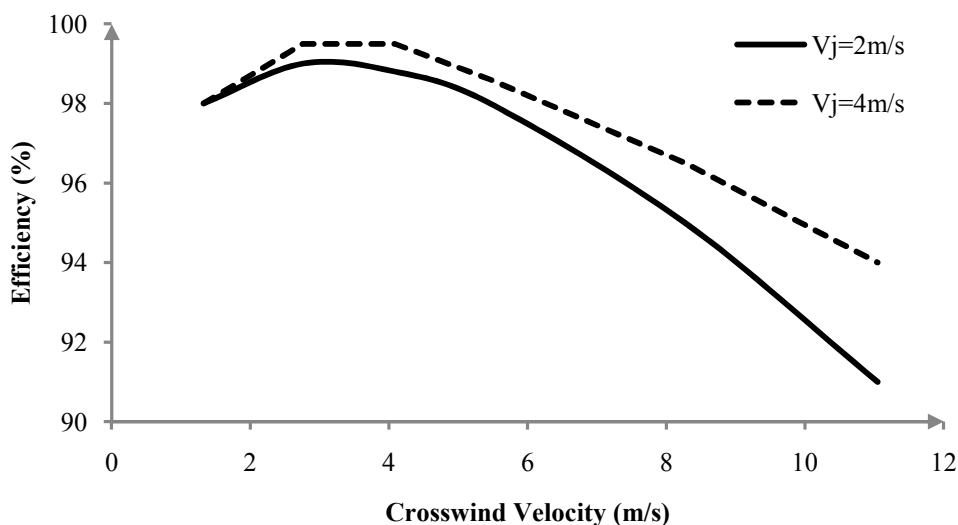


شکل ۷-۲۴ مقایسه بازده آزمایشگاهی و عددی

همانطور که در شکل مشاهده می شود، نتایج آزمایشگاهی و عددی تطابق خوبی نشان می دهند.

### ۷-۷ تأثیر سرعت گاز خروجی از فلر بر راندمان

همانطور که مشاهده شد، با افزایش سرعت باد محور شعله از حالت عمودی خارج شده و به سمت شعله افقی متمایل می گردد. پدیده خوابیدن شعله، که در سرعتهای بالای باد رخ می دهد به سرعت (مومنتوم) گاز خروجی وابسته است. از طرفی با افزایش سرعت گاز خروجی از فلر، اثر منفی سرعت باد کاهش یافته و روند نزولی کاهش راندمان با افزایش سرعت باد، در سرعتهای بالاتری از سرعت باد رخ می دهد. در شکل ۷-۲۵ اثر سرعت خروجی گاز فلر بر راندمان فلر در سرعتهای مختلف باد نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سرعت گاز خروجی راندمان فلر در سرعتهای بالای باد، افزایش چشمگیری می یابد.

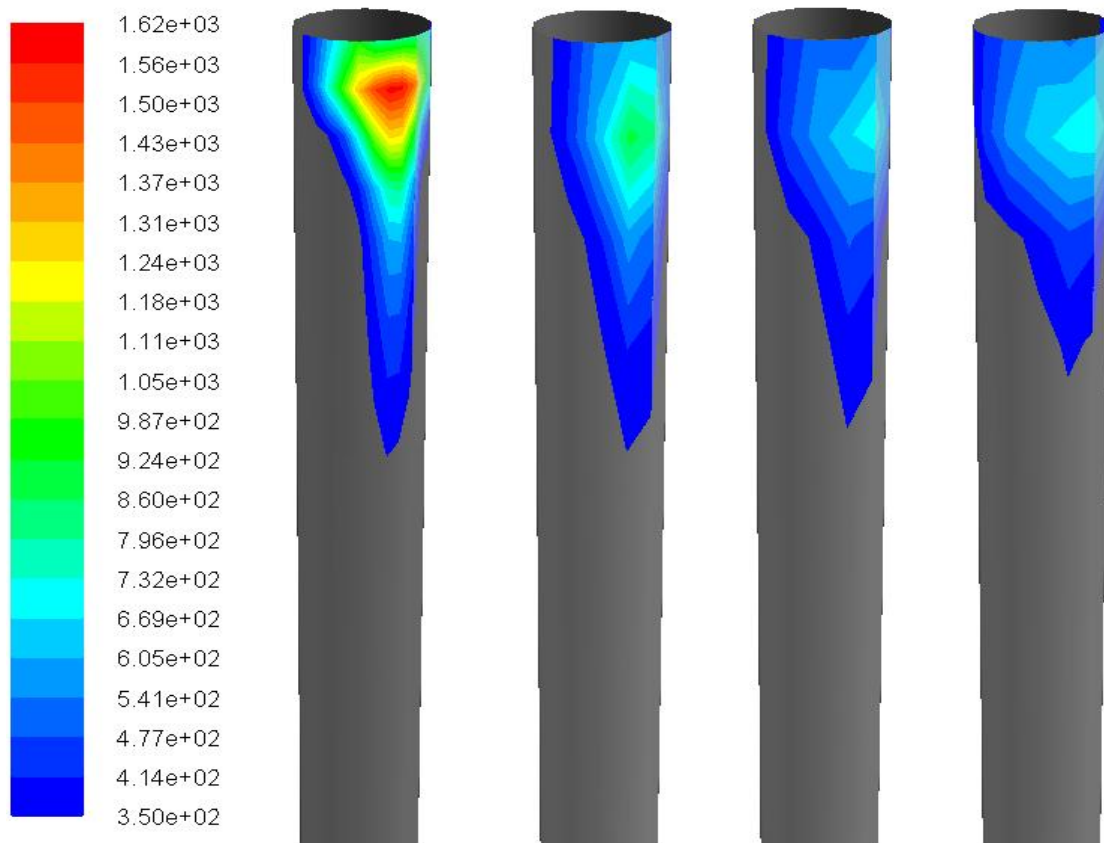


شکل ۷-۲۵ اثر سرعت باد بر راندمان احتراق فلر در دو سرعت متفاوت گاز خروجی فلر

دلیل افزایش راندمان با افزایش سرعت گاز فلر، افزایش مومنتوم جت خروجی از فلر و افزایش زاویه شعله نسبت به افق می باشد. همچنین در این حالت شکل شعله در سرعتهای بالای باد، شکل مناسب تری خواهد داشت.

### ۷-۸ تأثیر پدیده خوابیدن شعله بر دمای دیواره فلر

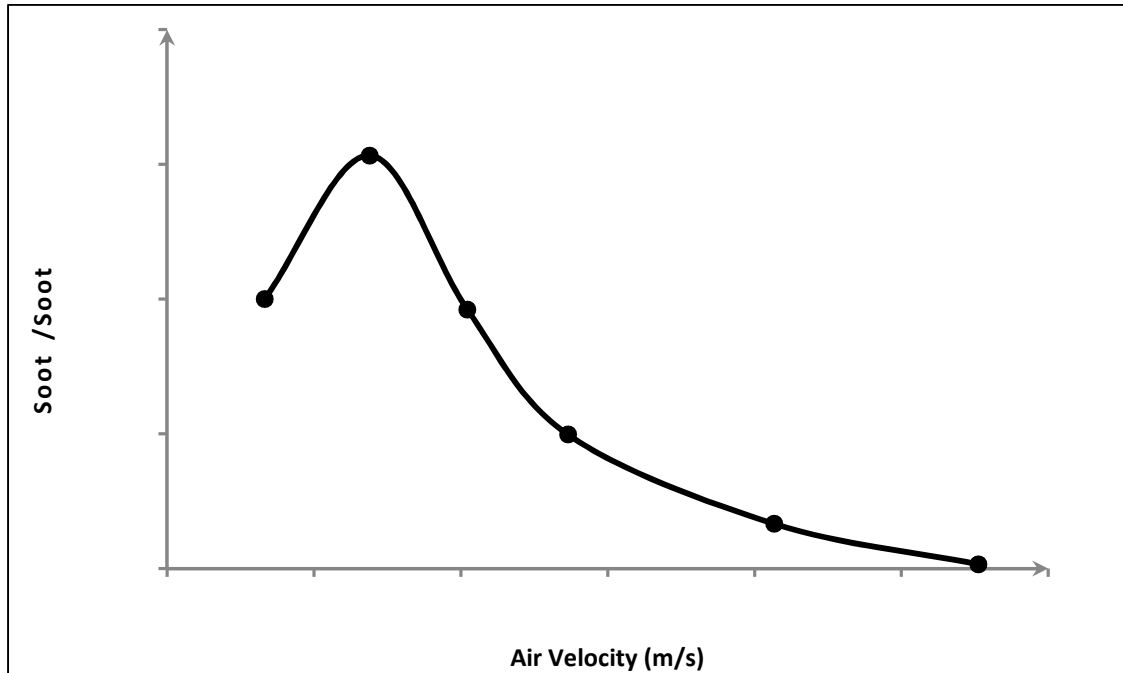
با خوابیدن شعله بر روی بدنه فلر در سرعتهای بالای باد، این ناحیه از فلر داغ شده و تنشهای حرارتی زیادی در آن تولید می شود و به تدریج باعث گسیختگی این قسمت خواهد شد. در شکل ۷-۲۶ توزیع دما در اطراف بدنه فلر در سرعتهای مختلف باد نشان داده شده است.



شکل ۷-۲۶ مقایسه توزیع دما روی بدنه فلر در سرعتهای مختلف باد

#### ۹-۷ آلایندهها

دوده یکی از انواع آلایندههای حاصل از احتراق فلر بوده که برای کاهش میزان انتشار آن می بایست در ابتدا رفتار آن در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گیرد. از عوامل مؤثر بر انتشار دوده میزان اختلاط سوخت و هوا، دمای شعله و دمای محیط اطراف می باشد. در مورد فلرها سرعت جریان باد تأثیر قابل توجهی بر میزان انتشار این آلاینده دارد. میزان انتشار دوده در سرعتهای مختلف باد در شکل ۷-۲۷ بررسی شده است. لازم به ذکر است در شکل فوق، تمام مقادیر نسبت به مقدار دوده منتشر شده در سرعت باد  $1/33$  متر بر ثانیه سنجیده شده است.

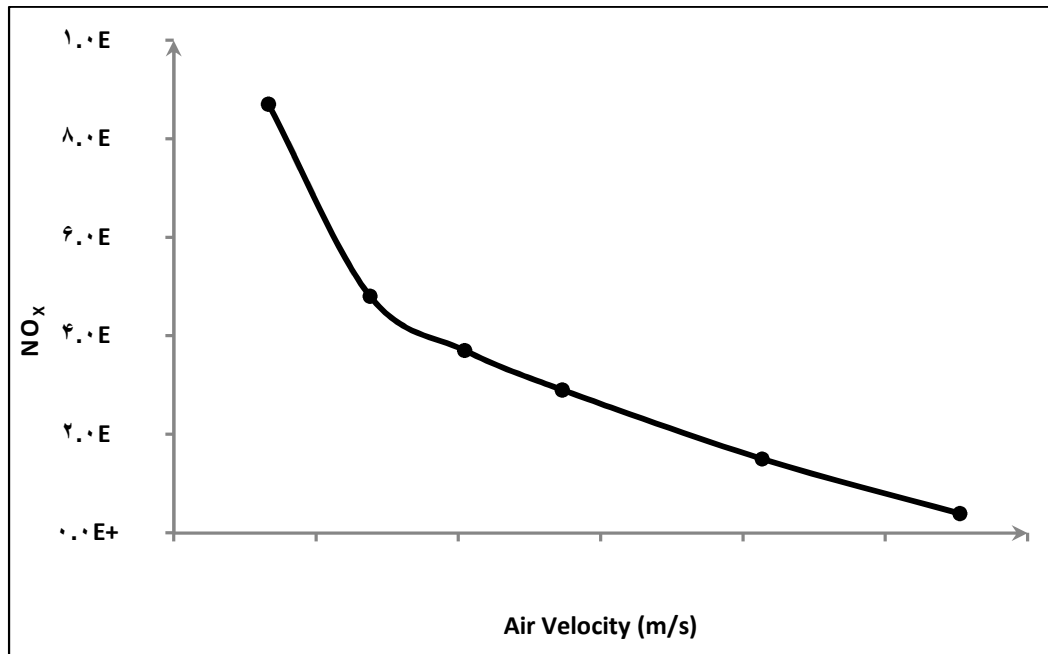


شکل ۷-۲۷ اثر وزش باد بر مقدار انتشار دوده در سرعت‌های مختلف باد

همانطور که در شکل ۷-۲۴ مشاهده می‌شود، در ابتدا با افزایش سرعت باد (۳.۵ متر بر ثانیه) مقدار دوده به بیشترین مقدار می‌رسد و بعد از آن کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه تشکیل و احتراق دوده شدیداً به دما بستگی دارد لذا در سرعت ۲/۷۶ متر بر ثانیه که بیشترین دمای شعله و راندمان را داریم، بیشترین تولید دوده نیز مشاهده می‌شود. اما با توجه به احتراق در محیط آزاد، دوده تشکیل شده به سرعت سرد شده و نمی‌تواند مجدداً محترق گردد. لذا در سرعت‌های پایین بیشترین مقدار دوده مشاهده می‌شود. از طرفی در سرعت‌های بالا یدلیل عدم دمای کافی مخلوط گازی، مقدار تشکیل دوده بسیار اندک می‌باشد.

#### ۸-۱۴-۱ آلاینده اکسیدهای ازت ( $\text{NO}_x$ )

$\text{NO}_x$  یکی دیگر از آلاینده‌های سمی و خطرناک تولید شده در سیستم‌های احتراقی بوده که لازم است تا مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۷-۲۸ مقدار کسر جرمی  $\text{NO}_x$  بر حسب ppm در سرعت‌های مختلف جریان باد بر روی نمودار رسم شده است.



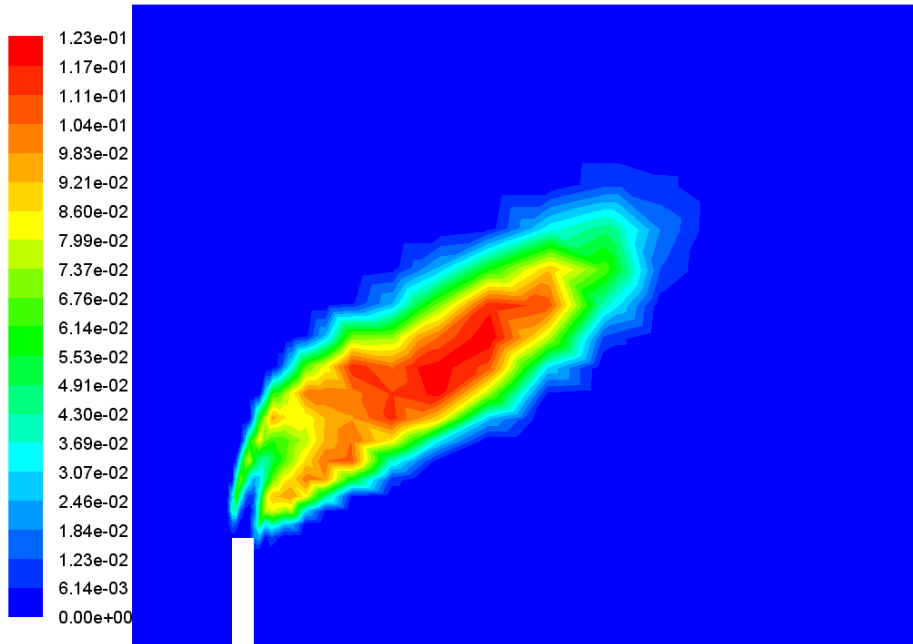
شکل ۷-۲۸ توزیع کسر جرمی  $NO_x$  در سرعت‌های مختلف باد

همانطور که مشاهده می‌شود، هر چه سرعت جریان باد بیشتر شود، مقدار آلاینده  $NO_x$  تشکیل شده کاهش می‌یابد؛ به طوری‌که در سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه تقریباً مقدار این آلاینده به صفر خواهد رسید.

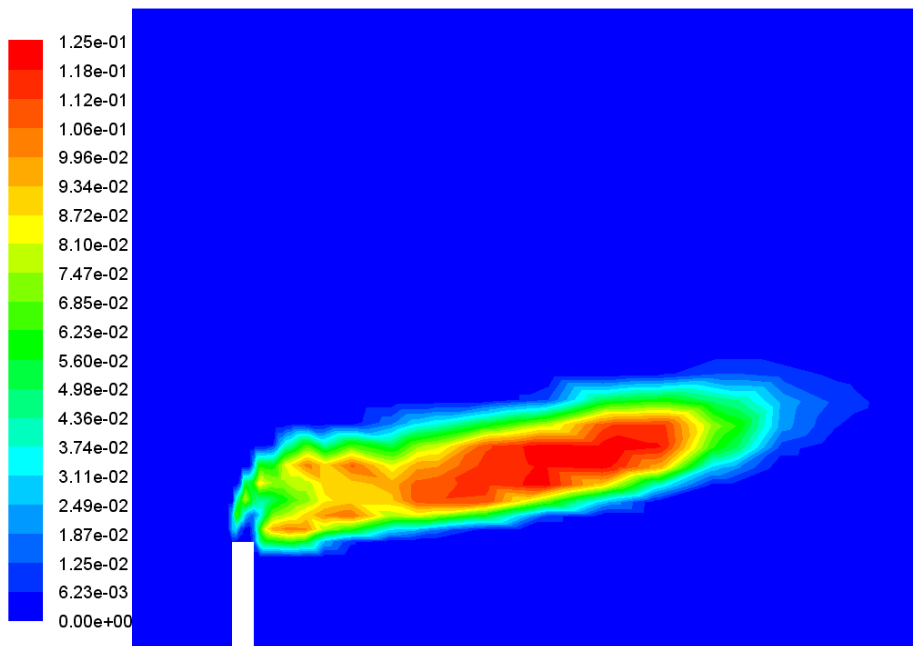
#### ۸-۱۴-۲ آلاینده مونواکسید کربن (CO)

مونواکسید کربن گازی بی‌رنگ و بی‌بوست. این گاز بسیار پایدار و در جو دارای نیمه عمری از ۲ تا ۴ ماه است. جزء کوچکی از تروپوسفر را تشکیل می‌دهد و از فرآیندهای طبیعی و منابع انسانی تولید می‌شود. اطلاعات به دست آمده نشان می‌دهند که در چند دهه اخیر میزان CO به طور سالیانه ۱ تا ۲ درصد افزایش یافته، در حالی که غلظت اولیه آن در آتمسفر ۱۲۰-۵۰ ppb بوده است. میانگین غلظت آن به صورت فصلی تغییر می‌کند به طوری که بالاترین غلظت در فصل زمستان و پایین‌ترین غلظت در ماه‌های تابستان دیده می‌شود. بیشترین میزان CO در صنعت مربوط به فلرینگ گازها است. میزان انتشار CO در سرعت‌های باد مختلف، متفاوت است؛ لذا در این پروژه بررسی آلاینده مونواکسید کربن در سرعت‌های مختلف باد از اهمیت زیادی برخوردار است. در شکل‌های زیر توزیع پیوسته کسر جرمی مونواکسید کربن (CO) در اطراف دهانه فلر در ارائه می‌شود.

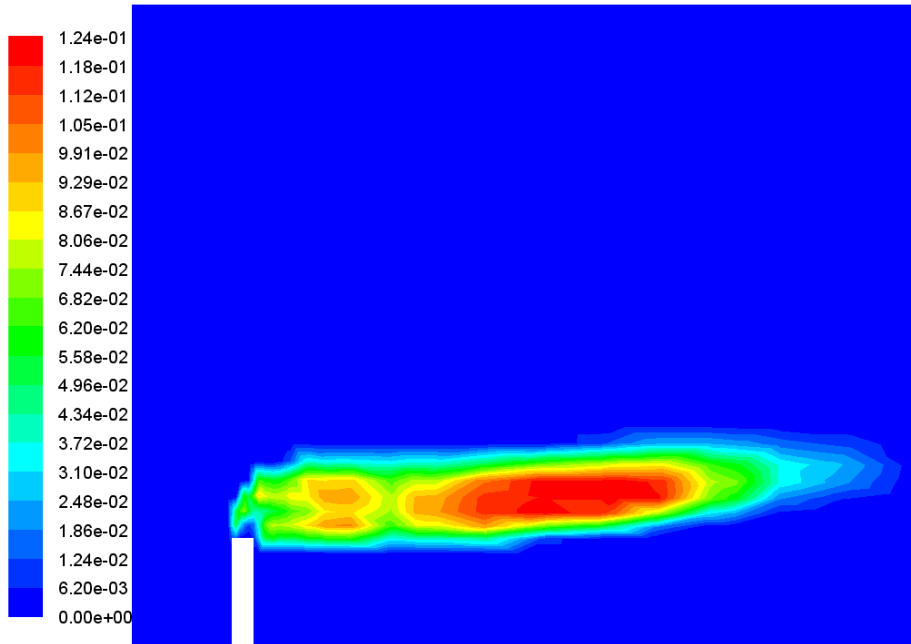




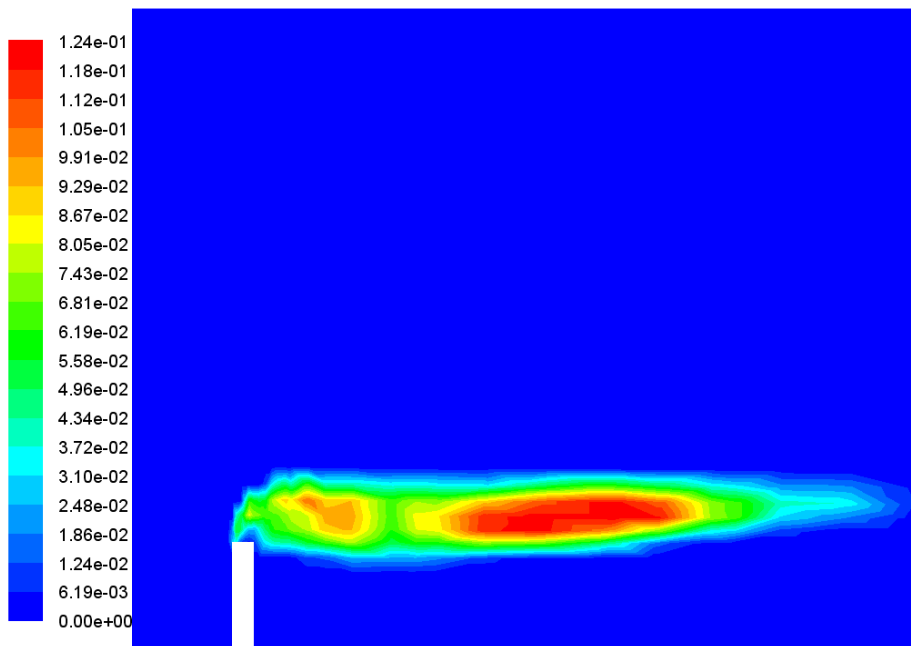
شکل ۷- ۲۹ توزیع جرمی آلاینده مونواکسید کربن در سرعت باد -



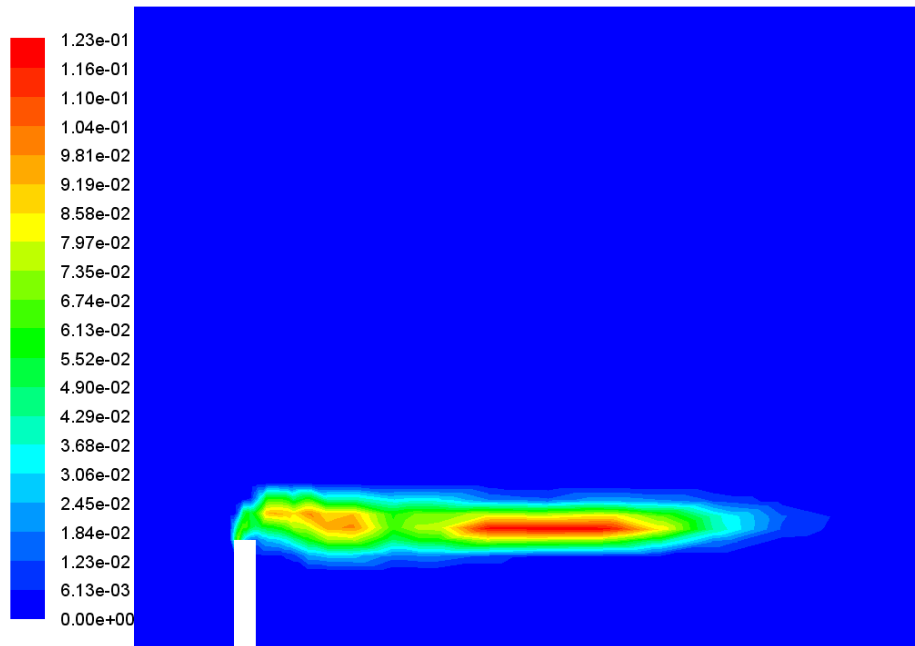
شکل ۷- ۳۰ توزیع جرمی آلاینده مونواکسید کربن در سرعت باد -



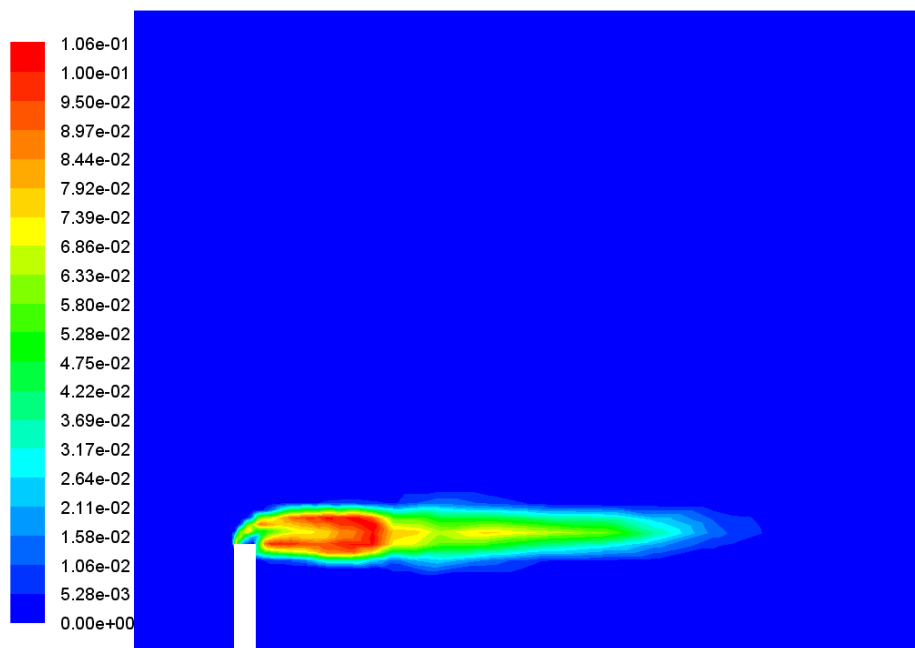
شکل ۷-۳۱ توزیع جرمی آلاینده مونواکسید کربن در سرعت باد -



شکل ۷-۳۲ توزیع جرمی آلاینده مونواکسید کربن در سرعت باد -



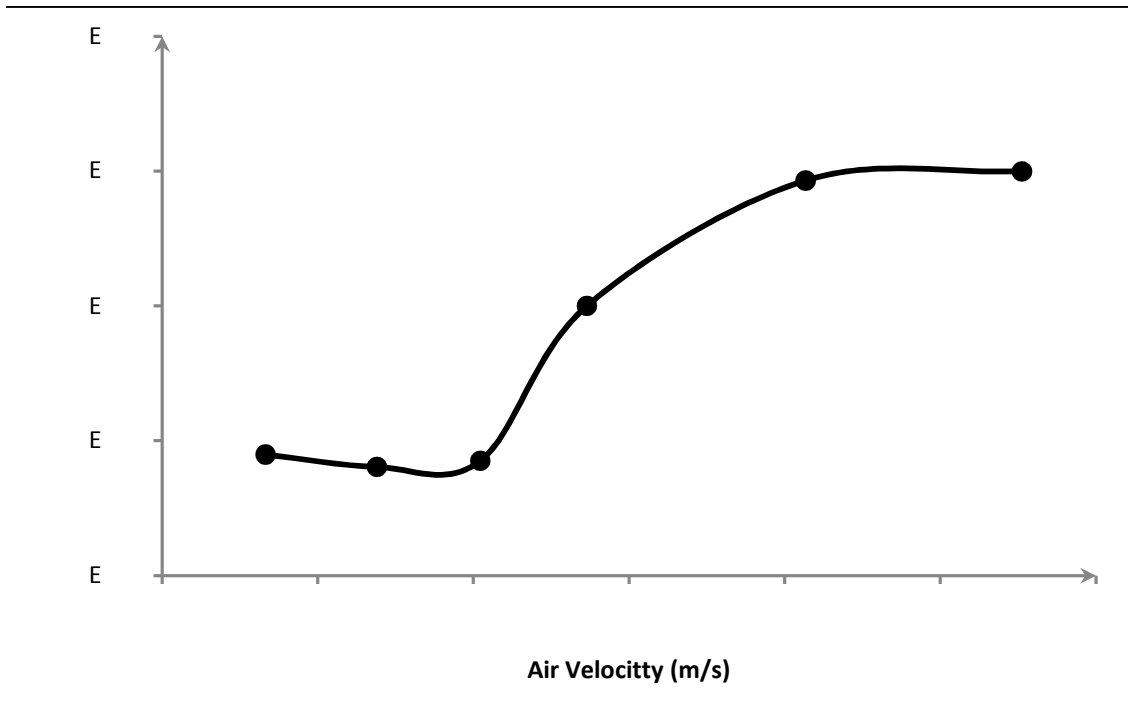
شکل ۷-۳۳ توزیع جرمی آلاینده مونواکسید کربن در سرعت باد -



شکل ۷-۳۴ توزیع جرمی آلاینده مونواکسید کربن در سرعت باد -

اگر شکل‌های بالا با شکل‌های مربوط به شعله مقایسه شود، مشاهده خواهیم کرد که بیشترین مقادیر CO در محدوده‌ای وجود دارد که دمای آن ناحیه بیشترین است. با افزایش سرعت باد منطقه ماکزیمم آلاینده CO کاهش می‌یابد، اما چون دمای شعله با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد، لذا شعله

توانایی کمتری در تبدیل CO به CO<sub>2</sub> دارد. این امر باعث کاهش راندمان احتراق و افزایش آلاینده CO در فضای اطراف فلر دارد.



شکل ۷-۳۵ بررسی اثر سرعت باد بر میزان CO تولید شده

در شکل ۷-۳۲، اثر سرعت باد بر میزان انتشار CO نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می-شود، با افزایش سرعت باد تا حدود ۴.۱ متر بر ثانیه مقدار انتشار CO کاهش یافته و سپس با افزایش بیشتر سرعت باد مقدار آن شدیداً افزایش می-یابد. می-توان گفت دلیل کاهش CO با افزایش سرعت باد اختلاط و وجود هوای کافی برای تبدیل CO به CO<sub>2</sub> می-باشد. اما افزایش بیشتر سرعت باد باعث سرد شدن شعله و عدم احتراق کامل CO می-گردد. در مجموع وزش باد در محدوده سرعت ۲ تا ۴ متر بر ثانیه بهترین شرایط از نظر راندمان و کاهش انتشار آلاینده CO مهیا می-کند.

## **فصل هشتم:**

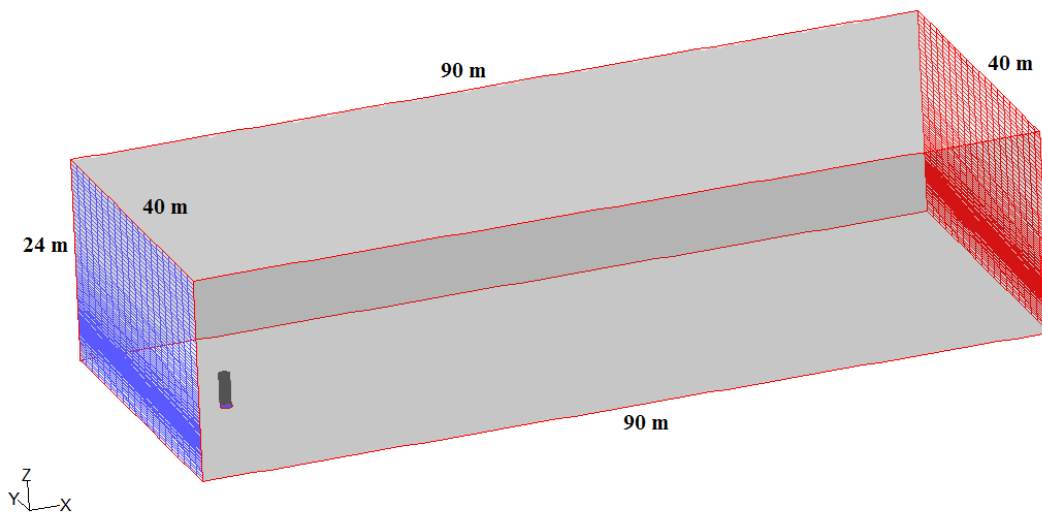
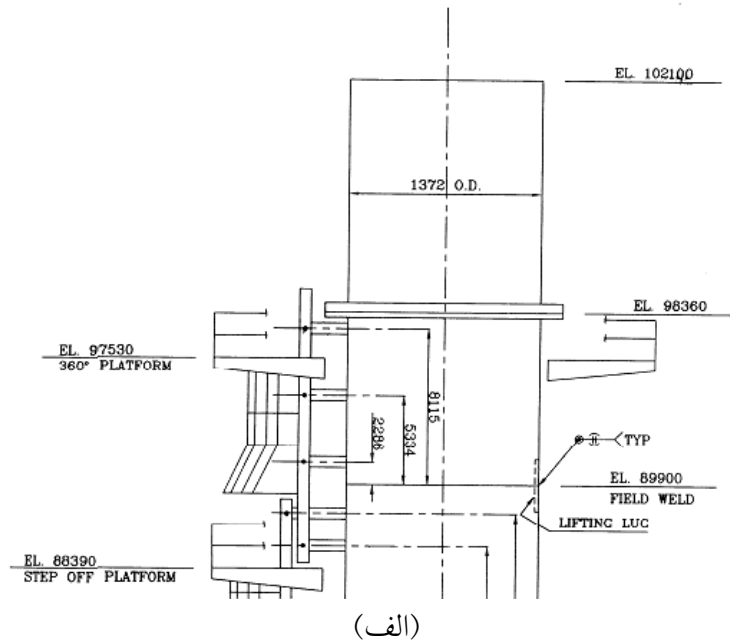
### **نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران**

## ۱-۸ مقدمه

احتراق گازهای ترش حاوی ترکیبات گوگردی در تیپ فلر بخصوص موقعی که در معرض جریان باد شدید قرار دارند، فرآیندی بسیار پیچیده بوده و انتخاب مدل‌های آشفته‌گی و احتراق مناسب بر دقت حل تاثیر بسزایی دارد. لذا در فصول قبل به بررسی و معرفی مدل‌های مختلف احتراق و تشکیل آلاینده‌ها و همچنین در فصل ۷، با شبیه سازی مدل آزمایشگاهی موجود در دانشگاه آلبرتا، به بررسی و اعتبار سنجی مدل‌های مختلف پرداخته شد. در این بخش به مطالعه اثر وزش باد بر احتراق گازهای ترش خروجی از فلر پالایشگاه خانگیران و اثر آن بر توزیع دما و انتشار آلاینده‌ها پرداخته می‌شود.

## ۲-۸ محیط حل

فلر واقعی دارای ارتفاع ۶۰ متر با ارتفاع نوک ۳ متر، قطر ۱/۰۷۳ متر می‌باشد. از آنجا که مهمترین بخش فلر به لحاظ شبیه‌سازی، نوک آن (Flare Tip) است و طبق مشاهدات تجربی نیز تنها بخشی از فلر است که دچار سوختگی می‌گردد، در این شبیه سازی تنها نوک فلر مدلسازی شده است. یک مکعب - مستطیل به طول ۱۵ متر، عرض ۵ متر و ارتفاع ۱۵ متر نیز به عنوان محیط اطراف فلر مدل شده است. محیط اطراف به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته می‌شود تا تغییرات پارامترها در امتداد آن ناچیز باشد. در مساله پیش رو تمامی ابعاد محیط حل بیش از ۵ برابر ابعاد فلر در نظر گرفته می‌شود. هندسه فلر و محیط حل در شکل ۱-۸ آورده شده است.

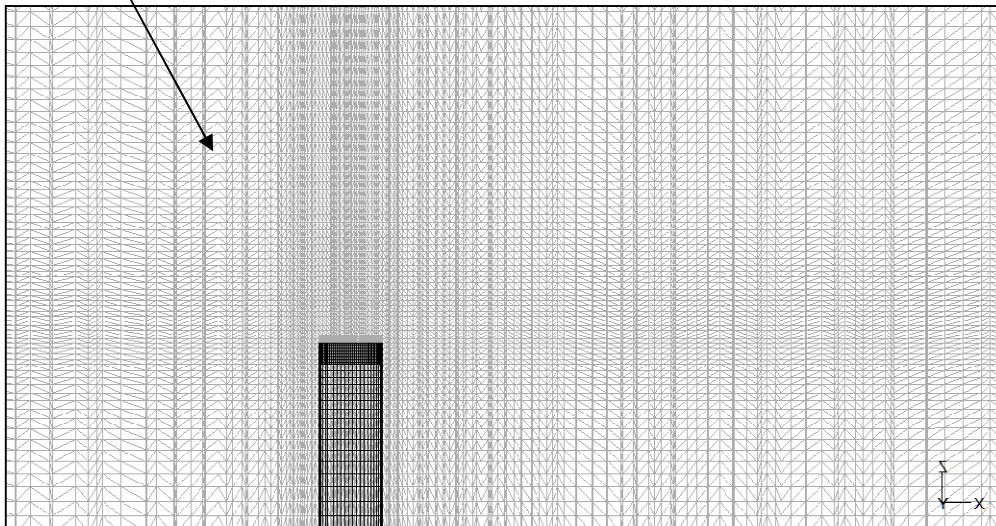
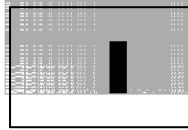
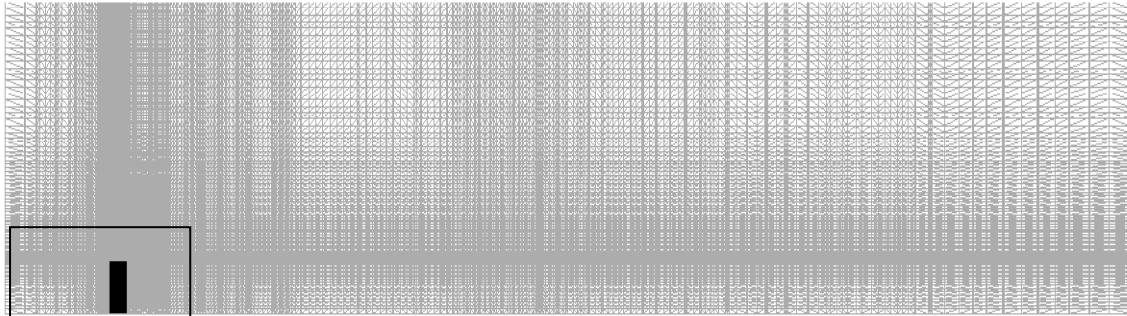


شکل ۸-۱. (الف) هندسه واقعی فلر و (ب) هندسه مدل سازی شده و محیط اطراف آن

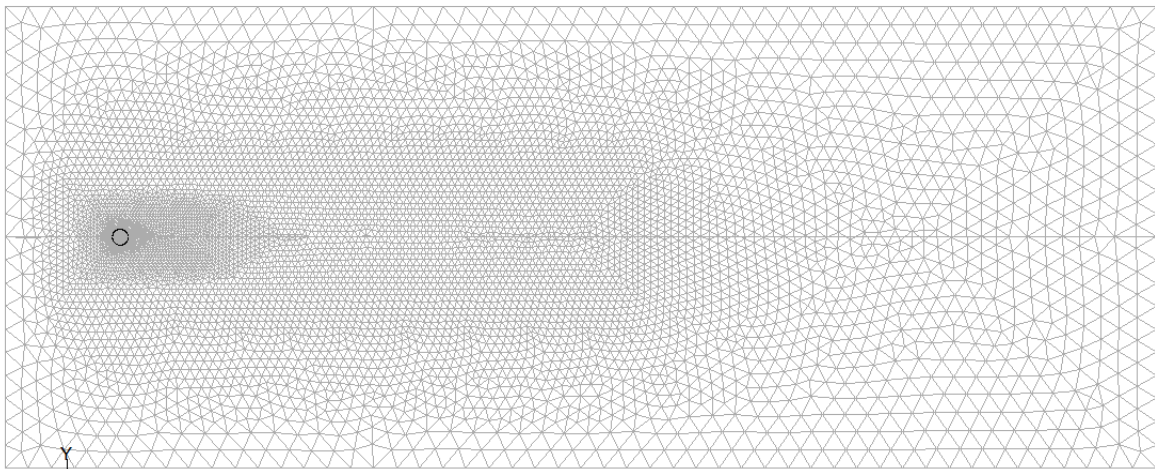
### ۸-۲-۱ تولید شبکه

پس از مدلسازی هندسه، نوبت به تولید شبکه برای آن می‌رسد. از آنجا که دقت نتایج در پیرامون فلر از اهمیت بالایی برخوردار است، نیاز است تا شبکه‌بندی ریزی در این منطقه اعمال شود. از سویی با توجه به اینکه ابعاد فلر در مقایسه با ابعاد محیط اطرافش بسیار کوچک است، برای برخورداری از یک شبکه منظم و مناسب، از یک استوانه با قطری معادل ۳ برابر قطر دهانه خروجی فلر، در اطراف آن استفاده شده است.

شبکه ایجاد شده به این روش در شکل ۲ نشان داده شده است. این شبکه بندی در مجموع دارای ۷۶۶۱۱۰ المان می باشد.



الف - نمای جانبی شبکه بندی



ب - نمای فوقانی شبکه بندی

شکل ۲-۸. شبکه بندی فلر و محیط اطراف آن



### ۲-۲-۸ شرایط مرزی

از شرط مرزی wall برای بدنه فلر و همچنین pressure outlet برای سطوح بالایی، پایینی، روبرو و پشت محیط حل اطراف فلر استفاده شده است. سطح سمت راست مکعب مستطیل (محیط اطراف فلر) محل وزش باد بوده و از این رو شرط مرزی Velocity inlet استفاده شده است که سرعت باد در این شرط مرزی اعمال می گردد. برای ورود گاز به لوله فلر، از شرط مرزی mass flow inlet استفاده شده است که دبی جرمی گاز و کسر جرمی ترکیبات داخل آن را در این شرط مرزی اعمال شده است.

### ۳-۲-۸ تنظیم مدل و پارامترهای حل

معادلات بقاء جرم، مومنتوم، انرژی، احتراق و تابش معادلاتی هستند که باید در این مساله مورد استفاده قرار گرفته و حل شوند. برای این منظور، نرم افزار FLUENT با استفاده از روش عددی حجم محدود این معادلات را به عبارتهای جبری قابل حل تبدیل و حل می کند. اما معمولاً به منظور برآورده نمودن شرایط فیزیکی واقعی تر لازم است تا شرایط پیش فرض در نظر گرفته شده برای حل این معادلات در نرم افزار FLUENT تغییر نمایند. این شرایط در هر مساله و با توجه به واقعیت های فیزیکی موجود، متغیر است. در جدول ۲-۸ مختصری از شرایط مختلف و همچنین مدل های بکاررفته در حل این مساله آورده شده است.

### ۴-۲-۸ بررسی کیفیت شبکه

برای نشان دادن اینکه شبکه تولید شده از دقت کافی برخوردار بوده و نتایج حاصل از آن مستقل از نوع شبکه بندی است، شبکه جدیدی که در آن تعداد شبکه ها، دو برابر شبکه بندی اولیه (۱۵۳۲۲۲۰ مش) است، ایجاد شده و سپس دمای شعله با استفاده از یکی از مدل های احتراق (مدل اتلاف گردابه ای) در این دو شبکه با یکدیگر مقایسه خواهد شد (شکل ۳-۸). چنانچه تغییرات دمای شعله در شبکه جدید (شبکه ظریف تر) تفاوت چندانی با تغییرات دما در شبکه اولیه نداشته باشد، می توان نتیجه گرفت که شبکه اولیه برای ارائه نتایج دارای دقت کافی خواهد بود و نیازی به ریزتر کردن شبکه نمی باشد. به عبارت دیگر نتایج حل مساله مستقل از نوع شبکه استفاده شده خواهد بود.

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران



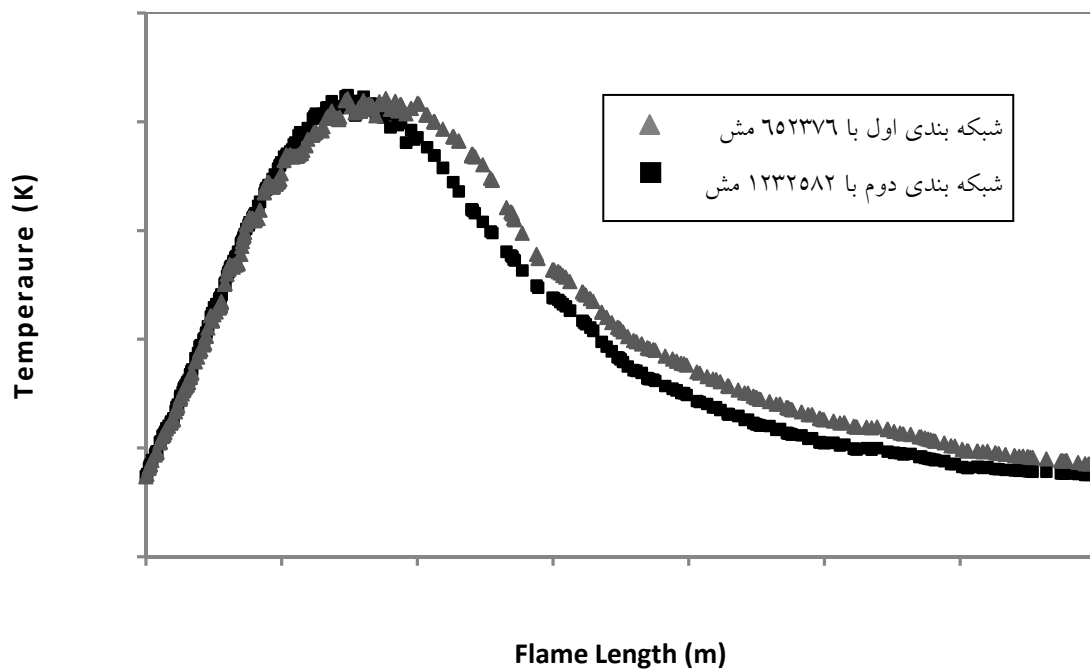
جدول ۸-۱. ترکیب گونه‌های موجود در

جریان سوخت عبوری از فلر

گونه	درصد مولی گاز ترش
	۸۸/۳۹
	۰/۰۰۰۰۱
	۰/۶۴۵
	۰/۳۸۵
	۸/۶۵
	۰/۶
	۰/۸
	۰/۵

جدول ۸-۲. شرایط و مدل‌های به کار رفته در حل مساله

Solver Adjustments	Steady Time Implicit Formulation 3D Pressure Based Solver
Viscous Model	RSM (Reynolds Stress Model) Linear Pressure-Strain Full Buoyancy Effect Wall Reflection Effects standard wall function
Species Models	Species Transport (Eddy Dissipation)-A=8 for CO and A=2 for CO <sub>2</sub> Non Premixed Model (PDF)
Reactions	Volumetric
Radiation Model	DO with absorption coefficient. wsggm
Mixture Material	مراجعه شود به جدول شماره ۱



شکل ۸-۳. تغییرات دمای شعله برای دو شبکه بندی مختلف

همانطور که در شکل فوق مشاهده می شود، تغییرات دما در دو شبکه بسیار نزدیک به یکدیگر می باشند. لذا نیازی به ریزتر کردن شبکه نخواهد بود و حل عددی مستقل از تعداد شبکه ها شده است.

### ۸-۳ شبیه سازی شعله فلر با سه ترکیب مختلف از گازهای خروجی

#### ۸-۲-۱ شکل شعله در مدل های مختلف احتراق

جهت محاسبه دمای بدنه فلر، ابتدا لازم است توزیع دمای شعله فلر و محصولات احتراق محاسبه گردد. سپس در اثر سیستمهای مختلف انتقال حرارت، دما بالای گازهای احتراقی سبب افزایش بدنه تیپ فلر می گردد. با توجه به اینکه گاز ورودی به فلر در شرایط مختلف عملکرد پالایشگاه می تواند مخلوطی از گازهای مختلف موجود در پالایشگاه از جمله گازهای فلاش درام، گازهای اسیدی و گاز ترش باشد، ابتدا احتراق هر یک از این سه گاز شبیه سازی می گردد و نتایج توزیع دمای آن با هم مقایسه می گردد. سپس نتایج با احتراق گاز ترش که تقریباً در بیشتر شرایط فلر با گاز ترش کار می کند و از طرفی به دلیل درصد بالای متان داخل آن بالاترین دما را دارد، بررسی می گردد. با توجه به پیچیدگی ترکیب گاز

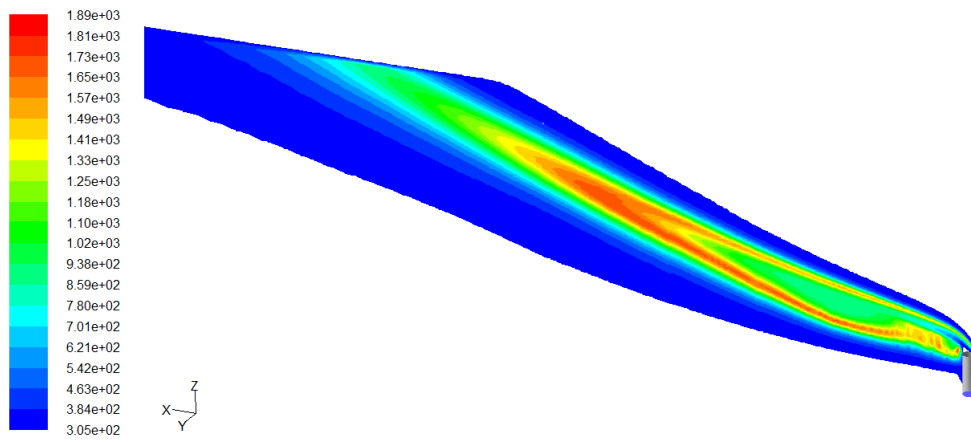
ورودی فلر، انتخاب مدل احتراق از اهمیت خاصی برخوردار است. در جریان آشفته از معتبرترین و پرکاربردترین آنها می توان به مدل اتلاف گردابه ای ( $EDM^{15}$ ) و مدل تابع توزیع احتمال ( $PDF^{16}$ ) اشاره نمود که در فصلهای قبل توضیح داده شدند. ولی با توجه به ترکیب پیچیده گاز که شامل ترکیبات گوگردی و هیدروکربنی مختلف (مطابق جدول ۸-۱) می باشد، می بایست از مدل PDF برای شبیه سازی احتراق استفاده گردد. در شکل ۸-۴ توزیع دمای شعله فلر به ازای سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه و برای سه ترکیب گاز مختلف زیر نشان داده شده است.

جدول ۸-۱. ترکیب گونه های موجود در جریان سوخت عبوری از فلر

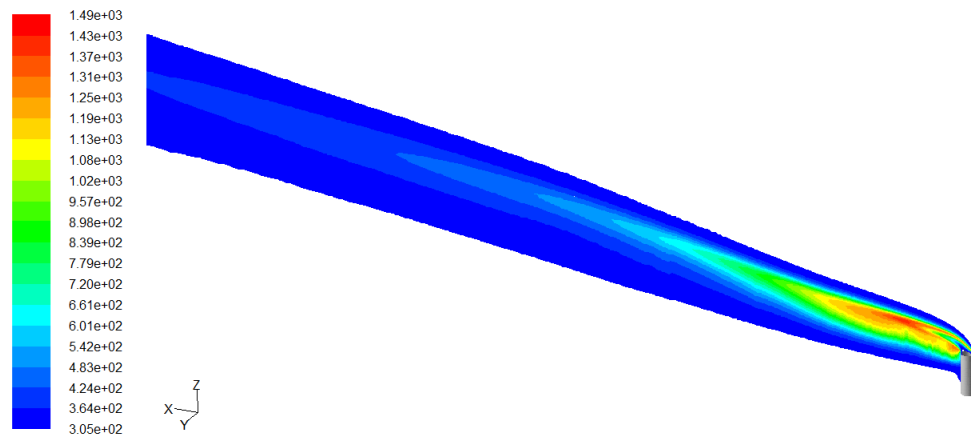
گونه	درصد مولی گاز ترش	درصد مولی فلش درام گاز	درصد مولی گاز اسیدی
	۸۸/۳۹	۴۷	۱/۰
	۰/۰۰۰۰۱		۹/۷۸۸
	۰/۶۴۵	۴۰/۷۵	۵۶/۳۶۵
	۰/۳۸۵	۸	۳۳/۹۴۵
	۸/۶۵	۳/۱	۸/۶۴۱
	۰/۶	۰/۱۵	--
	۰/۸	--	--
	۰/۵	۱	--

<sup>15</sup> Eddy-Dissipation Model

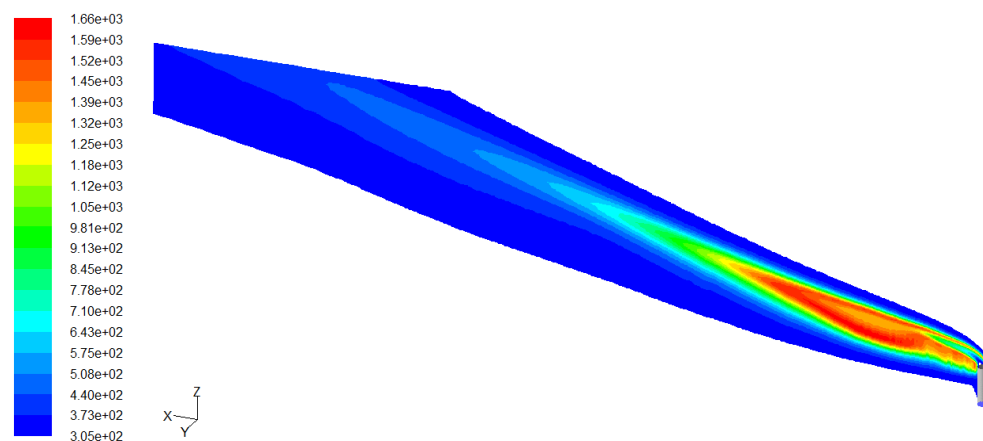
<sup>16</sup> Probability Distribution function



الف- گاز ترش (Sour gas)



ب- گاز اسیدی (Acid gas)

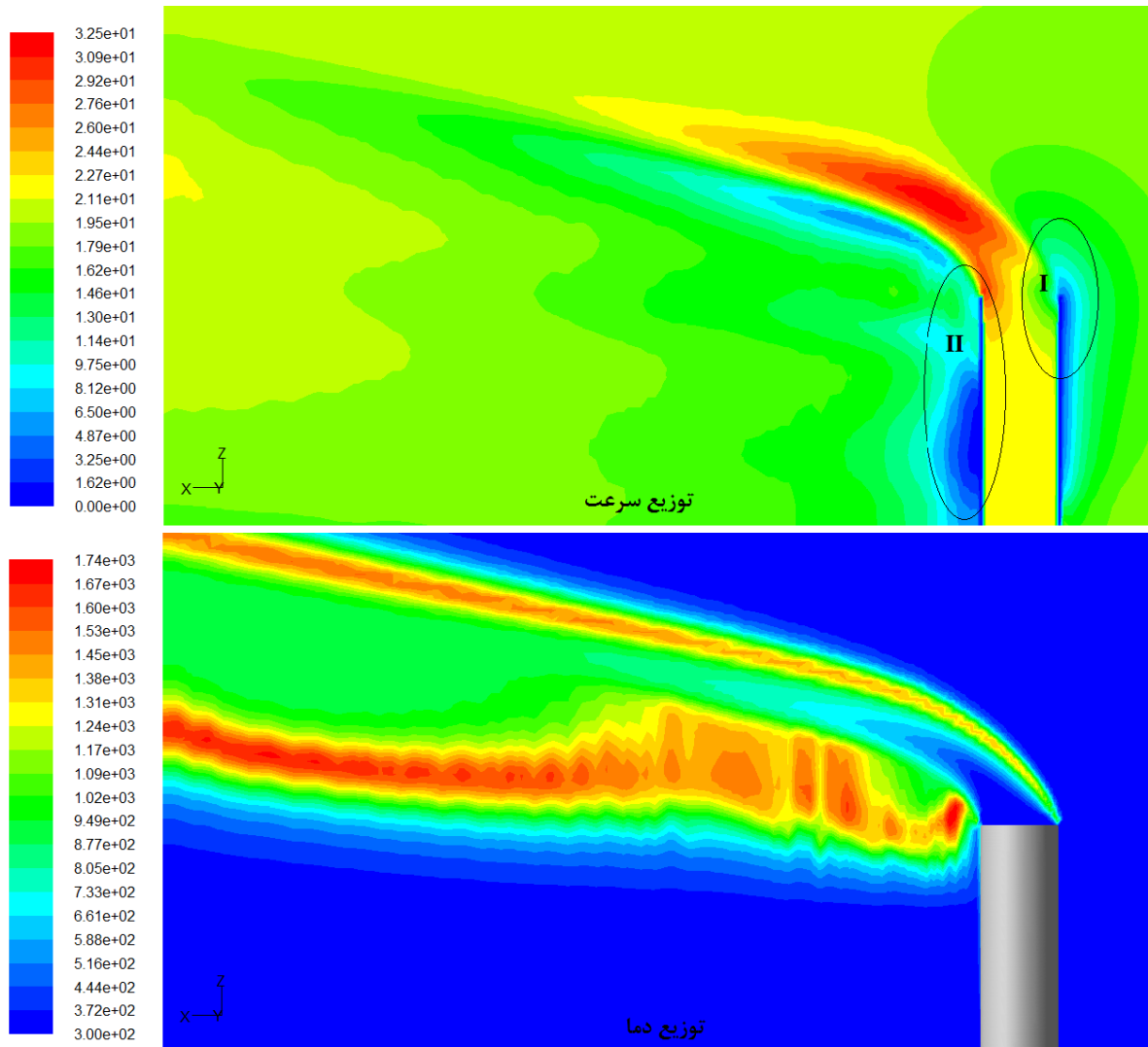


ج- گاز فلاش درام (Flash Drum gas)

شکل ۸-۴ مقایسه توزیع دمای شعله فلر در صفحه میانی برای سه ترکیب مختلف گاز در سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه

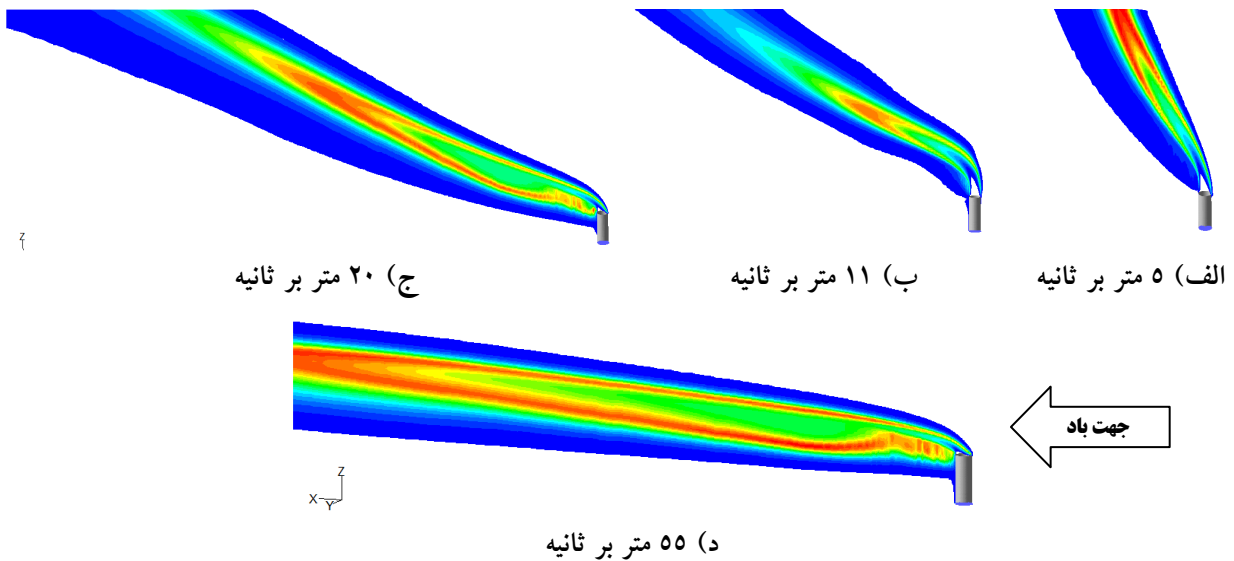
همانطور که مشاهده می شود دمای شعله ناشی از احتراق گاز ترش بیشینه دما ( $1890\text{K}$ ) را دارد. همانطور که مشاهده می شود بدلیل سرعت نسبتا بالای باد (نسبت به دبی گاز فلر) شعله به سمت بدنه فلر متمایل شده و بخشی از بدنه را نیز در سمت پشت فلر گرفته است. همچنین احتراق گاز ترش بدلیل حجم بیشتر متان، شعله بلندتری نسبت به گازهای فلش درام و گازهای اسیدی دارد. گازهای اسیدی احتراق بسیار بدی داشته و دمای بیشینه آن نیز از  $1500\text{K}$  تجاوز نمی نماید.

در شکل ۵-۸ نمای بزرگتری از شعله پشت تیپ فلر و توزیع سرعت اطراف آن نشان داده شده است. توزیع سرعت اطراف بدنه دو ناحیه کم سرعت یکی در لبه خروجی گاز از تیپ فلر (ناحیه I) و دیگر در سمت پشت به باد بدنه (ناحیه II) نشان می دهد که این دو ناحیه می تواند در سرعتهای بالای باد شعله را بداخل خودکشیده و سبب بالا رفتن دمای بدنه و سوختگی تیپ فلر گردد.



شکل ۵-۸ توزیع سرعت اطراف تیپ فلر و مقایسه آن با توزیع دمای اطراف آن برای گاز اسیدی

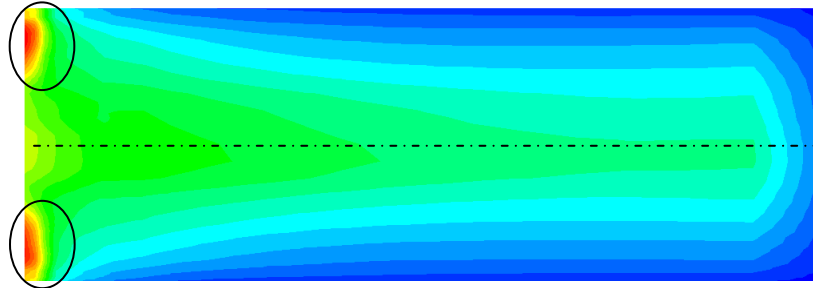
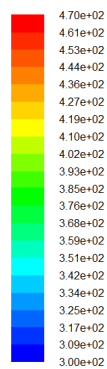
با توجه با ارتفاع فلر و شرایط محیطی منطقه خانگیران ، شعله در تیپ فلر بیشتر اوقات می تواند سرعت باد بین ۲ تا ۵۵ متر بر ثانیه را تجربه کند. لذا در زیر به بررسی شکل شعله و توزیع دمای آن در شرایط باد مختلف در یک دبی ثابت گاز خروجی از فلر ( ۲۲ کیلوگرم بر ثانیه یا حدود ۱۰۸۰۰۰ مترمکعب بر ساعت) پرداخته می شود. در شکل ۶-۸ اثر سرعت وزش باد بر شکل شعله به ازای ۴ سرعت بترتیب ۵، ۱۱، ۲۰ و ۵۵ متر بر ثانیه (از راست به چپ) بررسی شده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش سرعت باد شعله به سمت پشت بدنه فلر خوابیده، که این پدیده در سرعت ۲۰ و ۵۵ متر بر ثانیه بخوبی مشهود است.



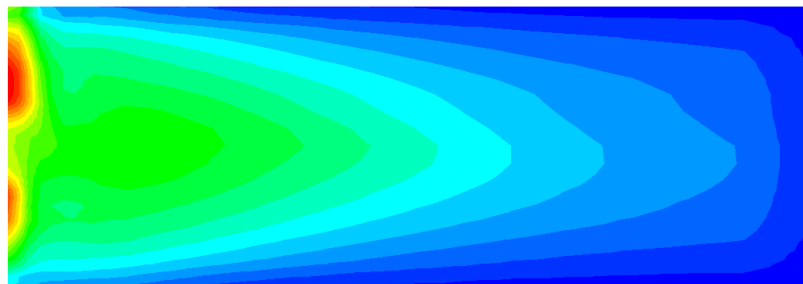
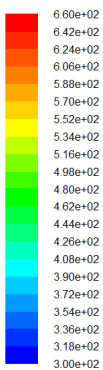
شکل ۸-۶- مقایسه شکل شعله تشکیل شده در تیپ فلر در سرعتهای مختلف باد

در شکل ۸-۷ توزیع دمای پشت بدنه تیپ فلر (در سمت پشت باد) در سرعتهای مختلف باد نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، ناحیه بیشینه دما بصورت دوگانه بوده که در دو طرف صفحه تقارن می باشد. همچنین دمای بدنه تیپ فلر در صفحه تقارن آن در سمت پشت به باد حتی در قسمتهای پایینی بدنه نیز افزایش چشمگیری نسبت به سمت مقابل باد داشته است. با توجه به اختلاف دمای نواحی مختلف بدنه تیپ فلر، تنشهای حرارتی زیادی در بدنه بوجود می آید. همچنین بدلیل تغییر دما و موقعیت نواحی دما بالا در سرعتهای مختلف باد، این تنشها می تواند باعث خستگی بدنه، شکست و ایجاد ترکهای عرضی و طولی در بدنه و تغییر شکل دائمی بخشهایی از بدنه گردد.

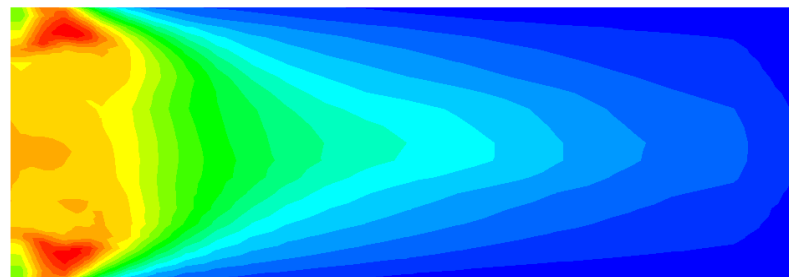
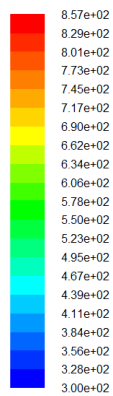




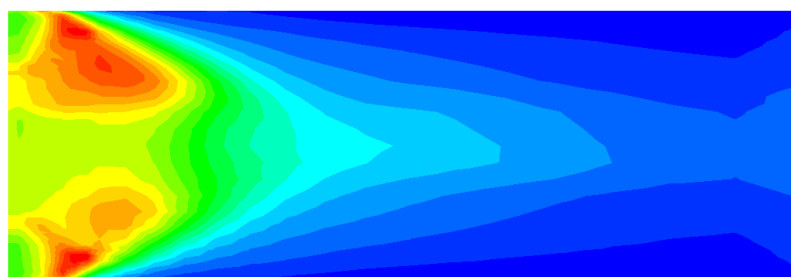
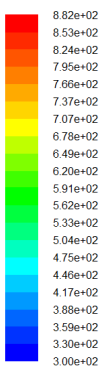
الف- سرعت باد ۵ متر بر ثانیه



الف- سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه



الف- سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه

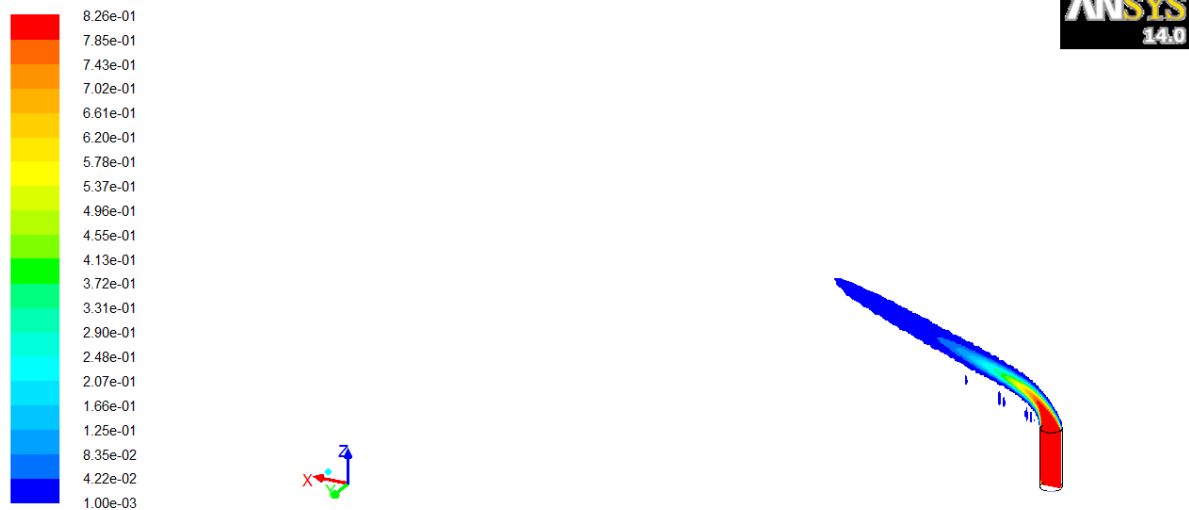


الف- سرعت باد ۵۵ متر بر ثانیه

شکل ۷-۸ توزیع دمای بدنه تیپ فلر در سرعتهای مختلف باد

### ۸-۴ انتشار آلاینده ها و گازهای گلخانه ای از مشعل فلر

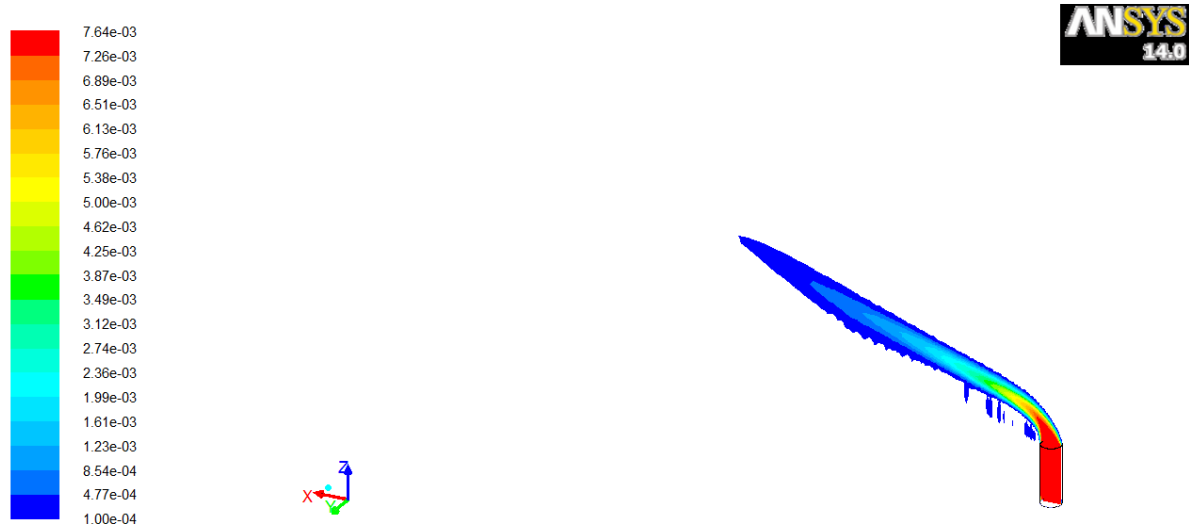
در شکلهای ۸-۸ و ۸-۹ توزیع کسر جرمی گونه های  $CH_4$  و  $H_2S$  روی صفحه تقارن جریان برای احتراق گازهای ترش نشان داده است.



Contours of Mass fraction of ch4

Apr 28, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, pdf20, rngke)

شکل ۸-۸ توزیع کسر جرمی  $CH_4$  احتراق گاز ترش در تیپ فلر برای سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه

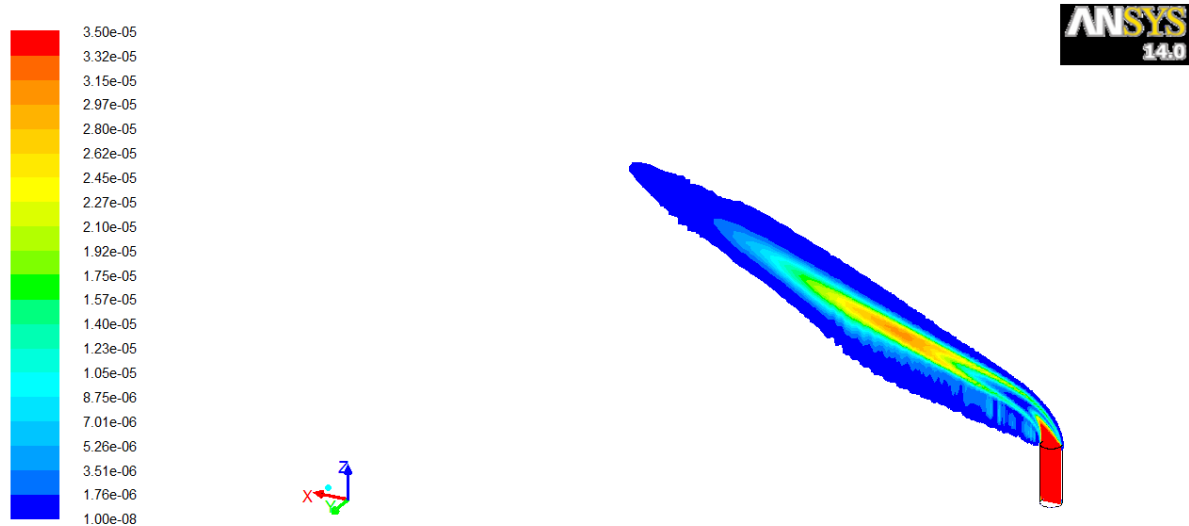


Contours of Mass fraction of h2s

Apr 28, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, pdf20, rngke)

شکل ۸-۹ توزیع کسر جرمی  $H_2S$  احتراق گاز ترش در تیپ فلر برای سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه

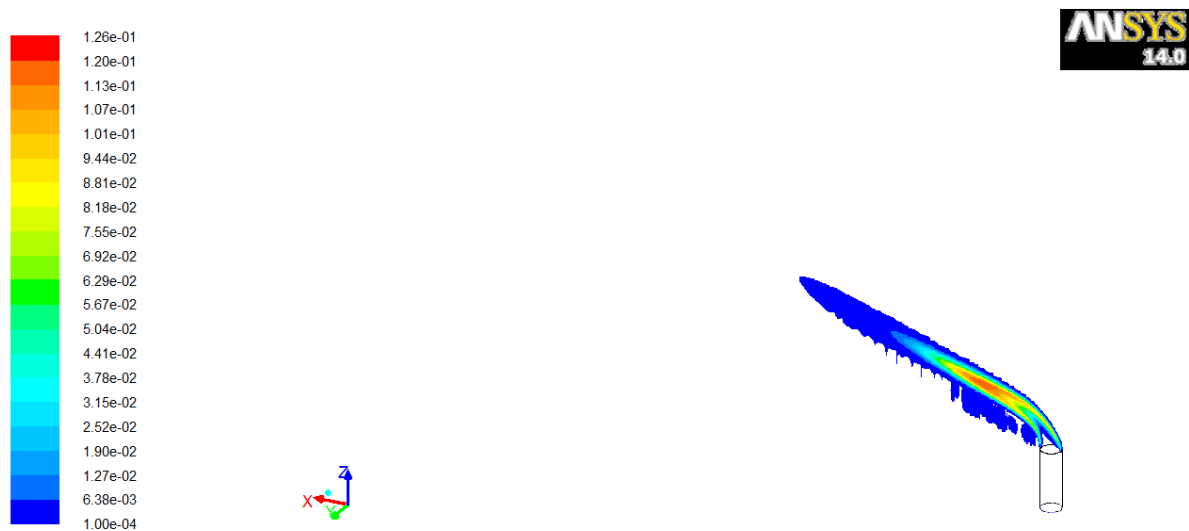
در شکل‌های ۸-۱۰ و ۸-۱۱ توزیع گونه های COS و C(s) (کربن جامد ناشی از تجزیه سوخت) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود COS موجود در گاز فلر، ابتدا وارد واکنش شده و مصرف می شود، اما سپس بدلیل واکنش گوگرد و ترکیبات کربنی (CO, C(s)) مجددا تشکیل می گردد.



Contours of Mass fraction of cos

Apr 28, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, pdf20, mgke)

شکل ۸-۱۰ توزیع کسر جرمی COS در احتراق گاز ترش در تیپ فلر برای سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه

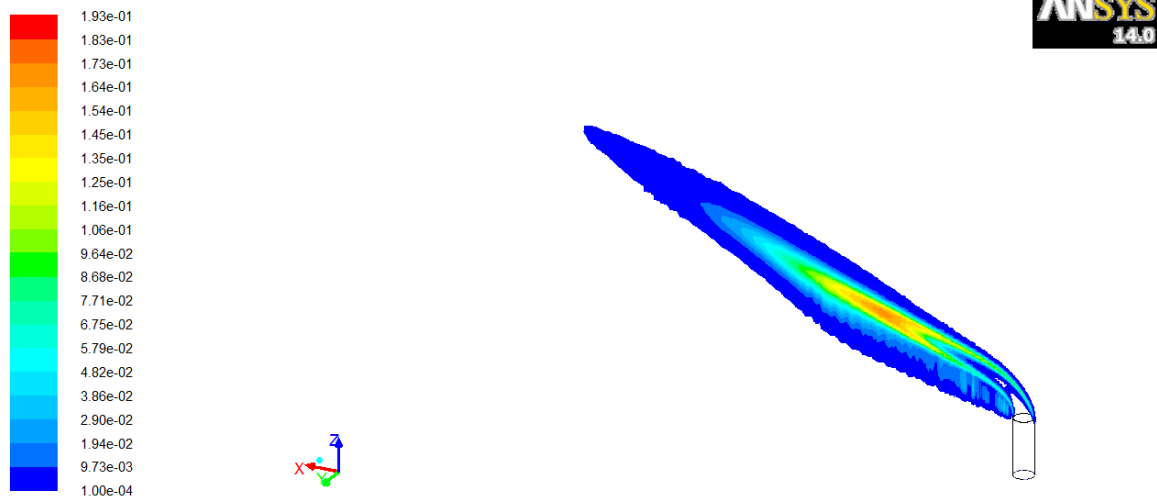


Contours of Mass fraction of c<s>

Apr 28, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, pdf20, mgke)

شکل ۸-۱۱ توزیع کسر جرمی C(s) حاصل از احتراق گاز ترش در تیپ فلر (سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه) کربن جامد از تجزیه حرارتی گاز متان و هیدروکربنهای حلقوی سنگین مانند بنزن در دماهای

بالای شعله تشکیل می گردد که در صورت دما و اکسیژن کافی مجدداً محترق و تبدیل به CO و سایر ترکیبات هیدروکربنی می گردد. اما در مناطق سرد شعله، این کربن جامد رشد نموده و بصورت ذرات دوده به محیط اطراف منتشر می گردد. نحوه تشکیل دوده در فصل ۶ توضیح داده شد. در شکل ۸-۱۲ تا ۸-۱۴ توزیع کسر جرمی آلاینده های CO، SO<sub>2</sub> و SO<sub>3</sub> نشان داده شده است. گازهای CO در شرایط دمایی مناسب و اکسیژن کافی به CO<sub>2</sub> تبدیل می شوند. همچنین گازهای SO<sub>2</sub> نیز در شرایط مناسب و اکسیژن کافی به SO<sub>3</sub> تبدیل می شود. گازهای CO<sub>2</sub> و SO<sub>3</sub> آلاینده گی کمتری نسبت به CO و SO و SO<sub>2</sub> دارند.



Contours of Mass fraction of co

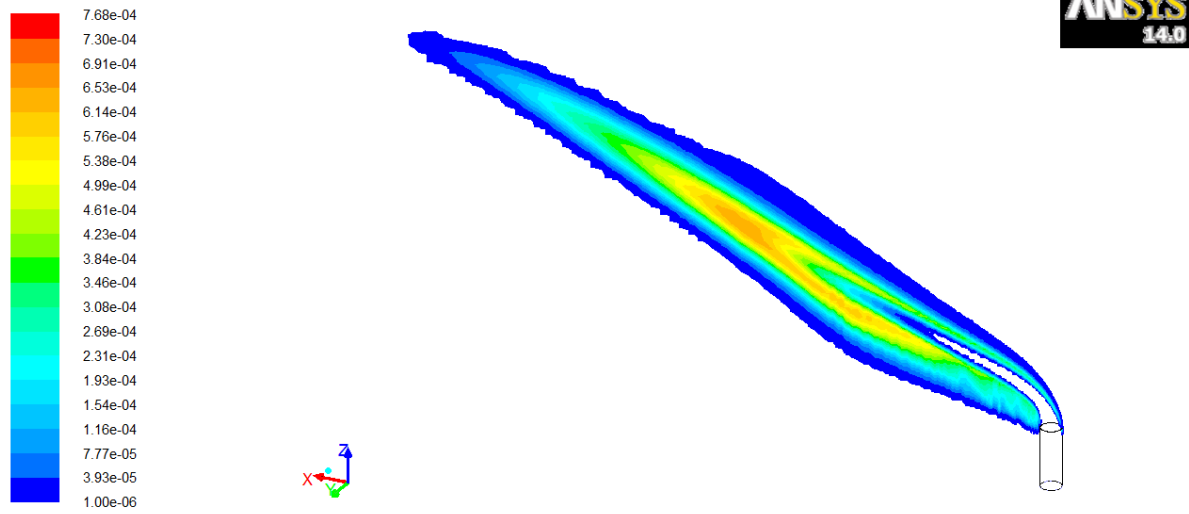
Apr 28, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, pdf20, rngke)

شکل ۸-۱۲ توزیع کسر جرمی CO حاصل از احتراق گاز ترش در تیپ فلر (سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه)

در شکل‌های ۸-۱۳ و ۸-۱۴ توزیع کسر جرمی گازهای SO<sub>2</sub> و SO<sub>3</sub> حاصل از احتراق گاز H<sub>2</sub>S در مشعل فلر نشان داده است. مشاهده می شود گاز SO<sub>2</sub> ابتدا در شعله تشکیل و سپس با احتراق مجدد به SO<sub>3</sub> تبدیل می شود. جهت بررسی دقیقتر اثر وزش باد بر تشکیل و انتشار آلاینده ها در شعله فلر، در شکل‌های ۸-۱۶ تا ۸-۱۸ کسر جرمی آلاینده ها روی محور شعله (شکل ۸-۱۵) مورد بررسی قرار گرفته است.

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

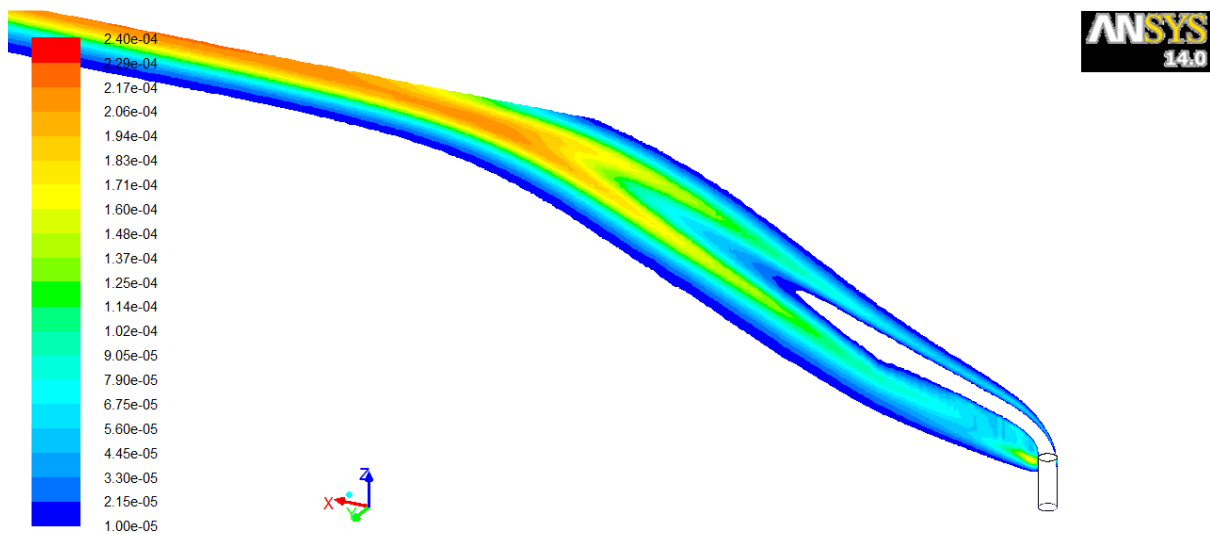
عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیان



Contours of Mass fraction of so2

Apr 28, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, pdf20, mgke)

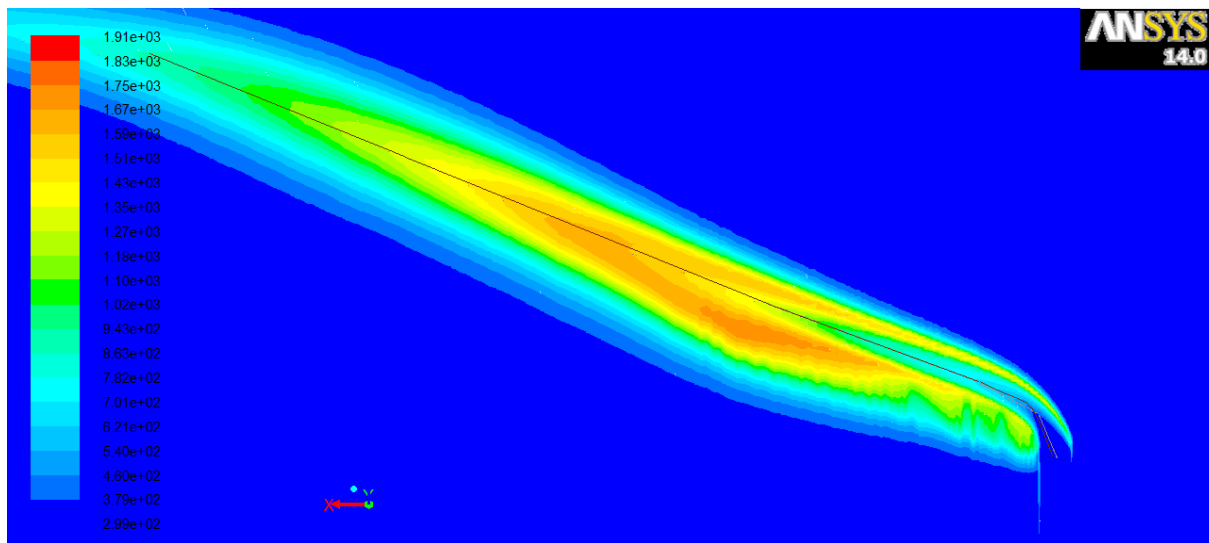
شکل ۸-۱۳ توزیع کسر جرمی  $SO_2$  حاصل از احتراق گاز ترش در تیپ فلر (سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه)



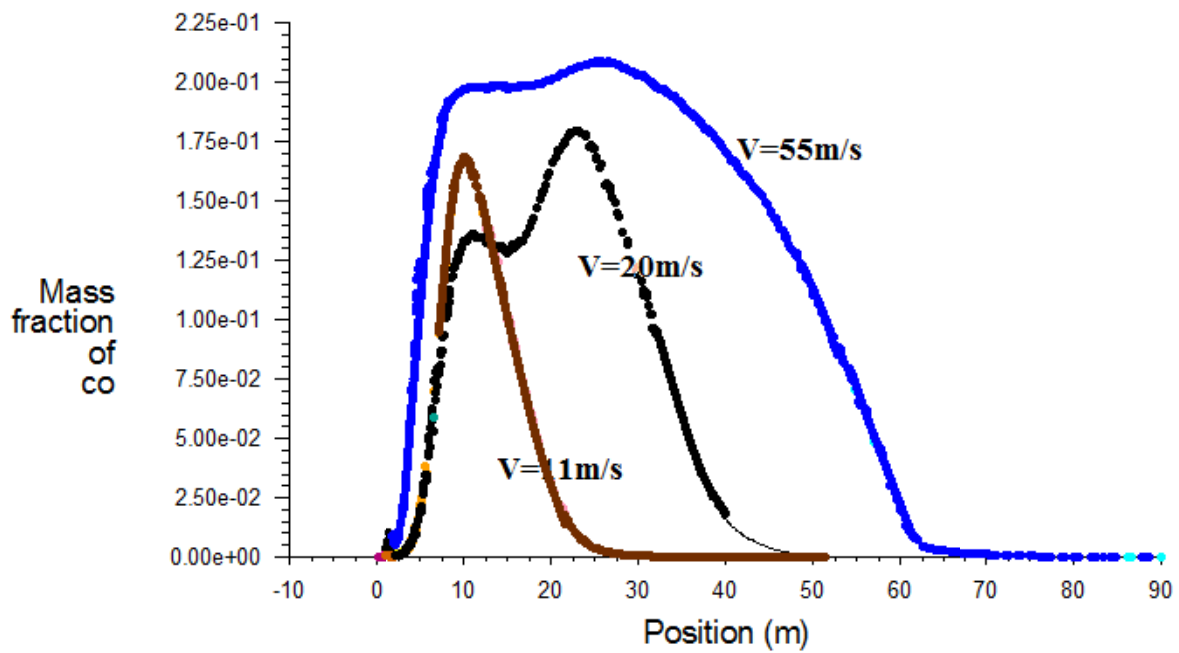
Contours of Mass fraction of so3

Apr 28, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, pdf20, mgke)

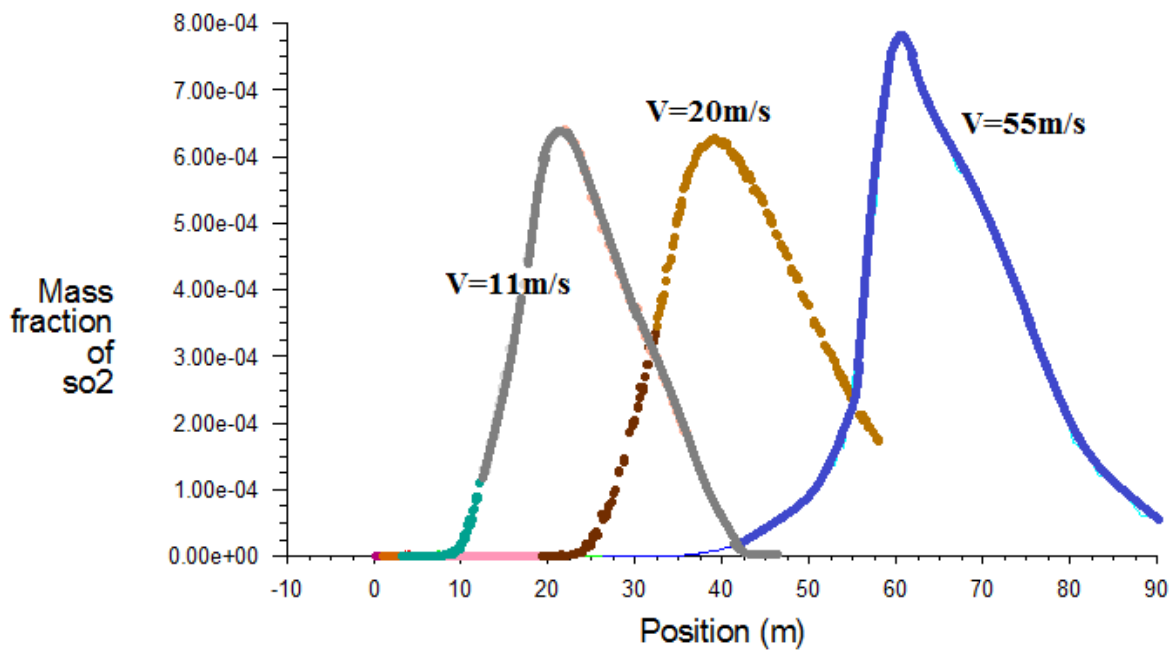
شکل ۸-۱۴ توزیع کسر جرمی  $SO_3$  حاصل از احتراق گاز ترش در تیپ فلر (سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه)



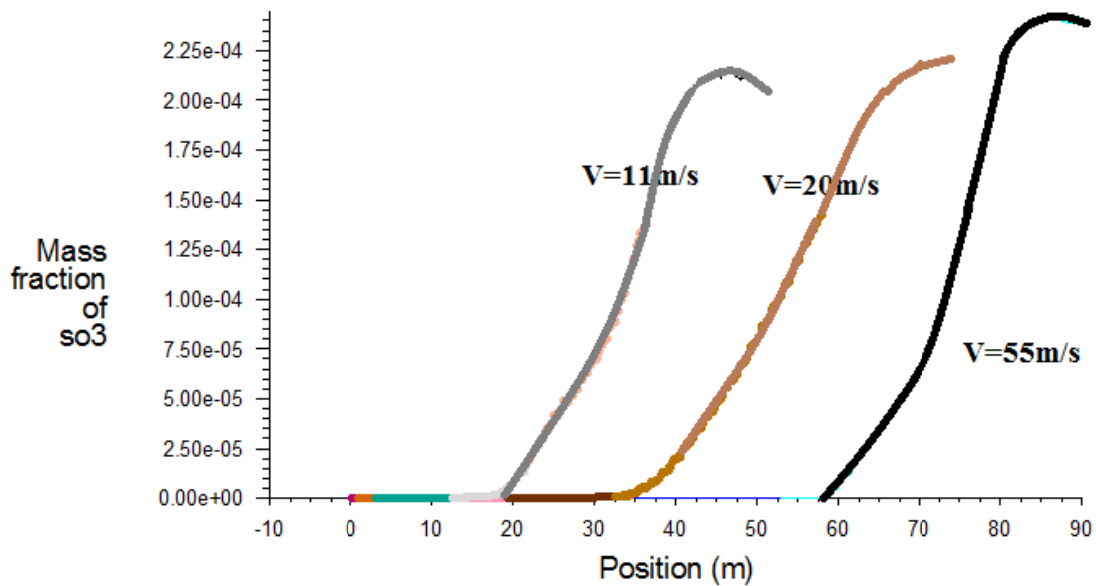
شکل ۸-۱۵ تعیین محور مرکزی شعله بر اساس توزیع دما (سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه)



شکل ۸-۱۵ مقایسه تغییرات کسر جرمی CO روی محور شعله در سرعتهای باد ۱۱ ، ۲۰ و ۵۵ متر بر ثانیه



شکل ۸-۱۵ مقایسه تغییرات کسر جرمی SO<sub>2</sub> روی محور شعله در سرعتهای باد ۱۱، ۲۰ و ۵۵ متر بر ثانیه



شکل ۸-۱۵ مقایسه تغییرات کسر جرمی SO<sub>3</sub> روی محور شعله در سرعتهای باد ۱۱، ۲۰ و ۵۵ متر بر ثانیه

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران



## فصل نهم:

# مطالعه آزمایشگاهی و عددی فرآیند پخت

## در زباله سوز



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران



۱- بررسی اثر میزان هوای ورودی در فرآیند پخت (Curing) زباله سوز

واحد؛ بازیافت گوگرد با استفاده از اندازه گیری

برای بازیافت گوگرد از گازهای اسیدی دو روش معمول و کاربردی وجود دارد که نسبت به روش های دیگر اقتصادی می باشد. این دو روش که اولین بار توسط دانشمندی به نام کلاوس (Clous) ابداع شد و به نام خود او نام گذاری شد عبارتند از:

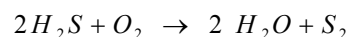
۱- SP لیتر FLOW

۲- ONCE THROUGH

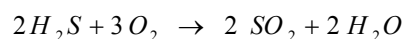
روش Sp لیتر flow وقتی به کار برده می شود که هیدروژن سولفور کمتر از ۵۰٪ باشد، خوراک واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه خانگیران ۳۳.۶۰٪ می باشد.

هدف اصلی از بازیافت گوگرد گازهای اسیدی در پالایشگاه خانگیران جلوگیری از آلودگی محیط زیست و تبدیل گازهای سمی به گازهای بی خطری که بشود آنها را در فضای اطراف پراکنده نمود، و گرنه بازیافت گوگرد با توجه به وسائل و مواد مصرفی از لحاظ اقتصادی توجیه چندانی ندارد. (با توجه به دور بودن بازارهای عمده جهانی).

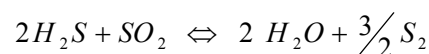
مزیت روش کلاوس بر سایر روش ها در ایجاد گرمای مفیدی است که برای تولید بخار آب به کار می رود. از نقطه نظر شیمیایی هدف اکسیده کردن هیدروژن سولفور ( $H_2S$ ) و تبدیل آن به گوگرد S و آب ( $H_2O$ ) می باشد.



البته این واکنش در یک مرحله انجام نمی گیرد و دو مرحله ای است، در مرحله اول یک سوم از گاز اسیدی با تمامی هوای لازم سوزانده می شود که تولید ( $SO_2$ ) و ( $H_2O$ ) می نماید.



دو سوم باقی مانده گاز اسیدی مستقیماً وارد کوره واکنش (Reactor Furnace) می شود. در کوره واکنش گازهای سوزانده نشده با  $SO_2$  حاصل واکنش پیشین ترکیب شده و تولید عنصر گوگرد می نماید.



توضیح اینکه کوره واکنش شامل دو قسمت کوره و راکتور می باشد. در کوره یک سوم گازهای اسید سوزانده شده و دو سوم باقیمانده با محصولات واکنش های پیشین در کوره با هم ترکیب می گردند. ۶۰٪ کل واکنش ها در کوره واکنش صورت می گیرد و ۴۰٪ باقیمانده در بسترهای کاتولیتی مراحل بعد انجام می شود. حدود پنجاه واکنش فرعی در کوره واکنش انجام می شود که گازهای تولیدی عمده آنها عبارتند از:  $H_2S$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $S_2$ ,  $COS$ ,  $CS_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$  و  $SO_2$  حدود ۵۴ درصد از مجموع کل گوگرد تولیدی واحد، به صورت بخار عنصر گوگرد در کوره واکنش تشکیل می گردد. در مراحل بعدی جهت تشکیل گوگرد، کارهای مشکل تری انجام می شود تا عملیات بازیافت گوگرد تقریباً کامل گردد. برای این کار ابتدا گاز خروجی از راکتور در بویلر سرد کننده گوگرد (Weast heat boiler) W.H.B سرد شده و گوگرد خنک شده از آن خارج می شود. در مراحل بعد طی سه مرحله متوالی عمل دوباره گرم کردن (Reheating)، تبدیل (Converting) و سرد کردن (Condensing) انجام می گیرد.

## ۲-۹ گردش جریان گاز اسیدی در واحد بازیافت گوگرد :

گاز اسیدی از طریق لوله جمع آوری کننده اصلی ۴۲ اینچ، که گازهای اسیدی واحد تصفیه را به واحد بازیافت گوگرد حمل می کند وارد تفکیک کننده گازهای اسیدی (A1-) (Asid gas kndek out drum) (2227-02) می شود. سپس گازهای اسیدی از بالای این دستگاه خارج شده و وارد کوره واکنش می گردند (۱-۱۵۰۱-۰۲). یک سوم گازهای اسیدی وارد کوره و دو سوم دیگر آن وارد راکتور می گردند و در آنجا با هوای کنترل شده ای که از دمنده های هوای (A,B1-1301-02) تأمین می گردد سوزانده می شوند. واکنش های داخل محفظه احتراق نسبت به زمان مناسبی که در طرحی پیش بینی شده به حالت تعادل نزدیک می شوند و در نتیجه ۵۴٪ از  $H_2S$  داخل گازهای اسیدی در راکتور به صورت عنصر گوگرد در می آید. ۴۶٪ باقیمانده بیشتر به صورت  $SO_2$  و  $H_2S$  ظاهر می گردد. هیدروکربن های داخل گازهای اسیدی با اکسیژن ترکیب شده و تشکیل  $CO_2$ ،  $CO$ ،  $H_2O$  داده که به همراه واکنش های جانبی، تولید  $CS_2$  و  $COS$  می نماید. تمامی این عملیات همزمان انجام می شود.

$CS_2$  و  $COS$  تشکیل شده، در مراحل بعد با هیدرولیزه شدن در قسمت پایین مبدل ها (Converters) از بین می روند. گرمای ایجاد شده در محفظه احتراق در ویست هیت بویلر جذب شده و در

آنجا تولید بخار آب اشباع شده با فشار متوسط MP می کند که به مصرف نیروی محرکه دمنده های هوای خود واحد می رسد. گاز حاصل از محفظه احتراق به دو قسمت تقسیم می گردد: یک مسیر اصلی و یک مسیر فرعی. مسیر اصلی از داخل تیوب های W.H.B می گذرد که در آنجا مقداری از بخار گوگرد (۱۵٪) سرد شده و از طریق سیل پات ۴ اینچ خود (Seal Pot) به حوضچه ذخیره گوگرد (SULFUR Pit) ریخته می شود. سپس از طریق لاین ۶۲ اینچ وارد دستگاه جداکننده گوگرد مذاب (COLESER) می شود تا قطرات گوگرد مایه که همراه گاز است از آن جدا گردد.

مسیر فرعی یک لاین ۲۴ اینچ می باشد که گاز گرم محفظه احتراق را به مخلوط کن (MIXER) می رساند. این مقدار گاز گرم باعث می شود که گازهای خروجی از جداکننده گوگرد مذاب ۲۲۲۳ که تا حدودی دمای خود را از دست داده اند دوباره گرم شوند. لاین ۲۴ اینچ فرعی هات گاز لاین (Hot Gas Line) نام دارد. گازهای مخلوط و گرم شده از میکسر به مبد می رسند و از بستر کاتالیزوری آن که از کوبالت مولیبدن و آلومینیوم دی اکسید تشکیل شده عبور می کند. سپس وارد مبرد گوگرد (Condenser) می گردد. این دستگاه ضمن مایع کردن قسمتی از بخار گوگرد و هدایت آن به حوضچه، با گرفتن گرمای آنها تولید بخار فشار ضعیف LP می نماید. سپس از (Coaleser) عبور می نماید که کار این دستگاه مشابه سایر کوالیسرها می باشد.

گازهای اسیدی بعد از گذشتن از این مرحله وارد کوره کمکی مرحله دوم می شود. سپس از مبرد گوگرد مرحله دوم می گذرد که این مبرد نیز تولید بخار آب LP می نماید. البته پیش از آن در بستر کاتالیزور مبدل عبور کرده. بعد از گذشتن از کوالیسر گازها مجدداً در کوره کمکی مرحله سوم گرم می شود و از مسیر کاتالیزوری مرحله سوم عبور نموده و سرانجام از مبرد گوگرد مرحله سوم و جداکننده گوگرد مذاب عبور می کند.

طی این سه مرحله در ۸ ایستگاه و از طریق ۱۱ عدد سیل پات گوگرد مذاب بازیافت شده به حوضچه می ریزد. کندانسر مرحله سوم بخار آبی با فشار خیلی پایین، حدود (kg/Cm<sup>2</sup> psi 9/14) تولید می کند. این بخار آب در خنک کننده هوایی (به صورت مایع درآمده و در مخزن آب مقطر مبرد گوگرد مرحله سوم جمع آوری شده و سپس به وسیله پمپ های آب مقطر به مخزن بخار آب مبرد گوگرد برگشت داده می شود.

سرانجام گازهای اسیدی خروجی از کوالیسر مرحله سوم برای احتراق و سوزانده شدن  $H_2S$  و بخار گوگرد باقیمانده در این گازها وارد زباله سوز شده که دارای سه مشعل می باشد و دمایی در حدود  $650$  درجه سانتیگراد دارد می شوند. و از آنجا وارد دودکش (Stack) می گردد تا در فضا پخش شود. قبل از گرفتن گاز اسیدی توسط واحد بازیافت گوگرد لازم است مرحله آماده سازی واحد که به مرحله CURING واحد مشهور است انجام شود برنامه CURING واحد به شرح ذیل می باشد.

### ۳-۹ چگونگی راه اندازی واحد بازیافت گوگرد پس از توقفهای کوتاه و طولانی مدت:

#### ۳-۱-۹ آماده کردن واحد برای راه اندازی اولیه :

الف : بازدید واحد قبل از راه اندازی اولیه، از جمله :

- ۱- بازرسی دستگاههای پالایش ، آب و برق و بخار ، ایمنی و ... به منظور تکمیل کارهای مکانیکی آن و تطبیق آنها با مشخصات طراحی
- ۲- راه اندازی واحدهای سرویس دهنده شامل آب و برق و بخار و سوخت ، هوای ابزار دقیق ، هوای مصرفی، فاضلاب و غیره .
- ۳- شستشو و تست کلیه لوله ها و مخزنها .
- ۴- راه اندازی و درجه بندی دستگاههای ابزار دقیق و سیستم S/D ، تا آنجا که ممکن است بدون آنکه مایعات پالایش در واحد باشد . ( ترانس دیوسر ، کنترل کننده ها ، کنترل ولوها ، فشار سنج ها ، مدار آلارم و S/D ها ) .
- ۵- نصب صافی های راه اندازی پمپها ، شیرهای ایمنی ، لوله های موقت راه اندازی و شیرهای کنترل کننده .
- ۶- روغن کاری کلیه شیرها و فن ها .
- ۷- بازدید پست های برق هم محور کردن موتورهای الکتریکی .
- ۸- بازدید و بررسی بخار دمنده های هوا .
- ۹- بازرسی کوره واکنش ، ( دیواره مشعلها و مرکزیت برنرهای کوره واکنش ) .

### ب : تخلیه گرد و خاک ( Dusting ) :

در این مرحله واحد می بایست مرحله به مرحله کاملاً گرد و خاک زدایی شود ، مش های کواسیرها بایستی باز باشد و پس از Dusting نصب گردد . این روش نخستین مرحله روش خشک کردن می باشد و می بایست در مدت حدود ۹۶ ساعت قدرت دمنده هوا انجام شود .

### ج : نشت یابی :

قبل از راه اندازی ، کلیه دستگاهها بایستی از نظر نشتی بازرسی شوند . دقت کافی می بایست در این مورد بکار گرفته شود و قبل از آن واحد از آشغال و کثافات عاری شده باشد . به علت آنکه H<sub>2</sub>S گازی است کاملاً سمی ، بایستی تمامی قسمتهای واحد اعم از لوله های پالایش ، مبدلها ، کوره های گرم کننده و سرد کننده های گوگرد کاملاً از نظر نشت نکردن گاز ، مطمئن شده باشند .

یک عدد صفحه کور در زباله نصب کرده و بایستی واحد را در فشار ۱/۵۴ اتمسفر با روشن کردن یک دمنده هوا تست نمود ، کنترل کننده 215 - Fic را چک کرده تا جریان هوا به خارج را برقرار کند . تمام واحد از جمله مخزن تفکیک اولیه را غیر از حوضچه گوگرد تحت فشار قرار داده و کلیه فلنج ها و غیره را به وسیله محلول کف صابون آزمایش نشت یابی شود .

کلیه فلنج ها پس از گرم شدن واحد و قبل از ورود گاز اسیدی به آن می بایست دوباره محکم شوند . پس از ورود گاز اسیدی به واحد فلنج های قسمت های حاوی H<sub>2</sub>S می بایست بوسیله کاغذ مرطوب استات سرب آزمایش شده و در صورت لزوم دوباره محکم شوند تا زمانی که این بازدید انجام نگرفته ، عایق بندی کامل نمی باشد . گاز H<sub>2</sub>S باعث می شود که صفحه آغشته به استات سرب به رنگ قهوه ای متمایل به سیاه تبدیل شود ( بستگی به غلظت دارد ) .

خشک کردن کوره های واکنش ، کمکی و زباله سوز : ( Curing ) خشک کردن و گرم کردن آجرها و سیمانهای نسوز استفاده شده در کوره ها بر اساس دستورالعمل های سازنده آن انجام می گیرد . به عنوان مثال دستورالعمل کیورینگ کوره واکنش واحد شماره یک که پس از عملیات تعمیرات اساسی سال ۸۵ توسط تولید کننده آجرها و سیمانهای نسوز به کار رفته در کوره ، ارائه گردیده است در ذیل آورده شده است .

### ۳.۲-۹ برنامه کیورینگ کوره واکنش :

- ۱: مشعل را در سرویس قرار داده و دما را به آرامی تا  $110^{\circ}\text{C}$  بالا برده در این دما به مدت چهار ساعت بماند
- ۲: سپس دمای کوره واکنش را تا دمای  $230^{\circ}\text{C}$  به میزان  $3^{\circ}\text{C/hr}$  افزایش دهید. (چهار ساعت).
- ۳: در دمای  $230^{\circ}\text{C}$  چهار ساعت توقف کنید. (چهار ساعت)
- ۴: دما را تا  $400^{\circ}\text{C}$  به میزان  $3^{\circ}\text{C/hr}$  بالا ببرید. (پنجاه و هفت ساعت)
- ۵: در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  بیست و چهار ساعت توقف نمایید. (بیست و چهار ساعت).
- ۶: دما را تا  $530^{\circ}\text{C}$  به میزان  $25^{\circ}\text{C/hr}$  بالا ببرید. (پنج ساعت و نیم)
- ۷: در دمای  $530^{\circ}\text{C}$  چهار ساعت توقف نمایید (چهار ساعت)
- ۸: دما را تا  $850^{\circ}\text{C}$  به میزان  $25^{\circ}\text{C/hr}$  بالا ببرید. (سیزده ساعت)

### ۳.۳-۹ بارگیری و شارژ کاتالیست :

کاتالیزورها و تکیه گاههای آنها می بایست قبل از آزمایش فشار و تخلیه واحد در مبدل گذاشته شود. قبل از اینکه مواد تکیه گاه کاتالیزور در مبدل گذاشته شود، دیواره آجری داخل کوره های این مرحله جهت ترک خوردگی می بایست بازرسی شود.

آستر داخلی می بایست مطابق دستورالعمل کارخانه سازنده و توسط پیمانکار ابتدا خشک شود. تمامی آجرهایی که شل کار گذاشته اند را مخصوصاً در نقاط خروجی گوگرد، محکم نموده و یا آن را جدا کرد. گوگرد با ذرات کاتالیزور و آجرهای نسوز ترکیب شده و تولید سیمان محکمی می کند که باعث انسداد مجرای خروج گوگرد خواهد شد. باید مطمئن شد که سکوها ننگه دارنده به خوبی به دیواره ها محکم شده اند. سپس روی سکوها را با یک لایه مواد زینی شکل (نگاه دارنده)  $1/5$  اینچی و یک لایه ۳ اینچی از مواد توبی شکل بی اثر پوشاند. جداره داخلی دریچه های آدم رو جانبی را آجر کاری کرده و با صفحات کور کننده مسدود نمود.

بایستی  $105$  متر مکعب کاتالیزور را از طریق دریچه های آدم رو بالای مبدل اول، وارد نموده و سطح آن را صاف نمود. دقت کرد که نصف پایینی بستر کاتالیزور (فقط در مبدل گوگرد مرحله اول) از نوع بخصوصی که در هیدرولیز موثر می باشد استفاده شود. پس از شارژ کاتالیزور باید دریچه های آدم رو

را بسته ، صفحه کور کننده خروجی گاز را سوار نموده و دریچه های بازرسی را باز کرد . هوای تخلیه به همراهی گرد و غبار از دریچه های زیر بستر کاتالیزور خارج می شود . به همین طریق مبدل های گوگرد مرحله دوم و سوم به ترتیب از کاتالیزور شارژ و توسط هوا دمیده شود . پس از آنکه شارژ کاتالیزور و عمل دمیدن هوا و تخلیه گرد و غبار پایان گرفت ، بایستی صفحه کور کننده بر روی خروجی گاز را خارج نمایم .

### ۳.۴-۹ برنامه راه اندازی عمومی :

هدف از این راه اندازی این است که قبل از ورود گاز اسیدی به واحد تا آنجا که ممکن است وسایل و دستگاهها را راه اندازی نمود . بنابراین کار واحد تصفیه با فرستادن گاز اسیدی به مشعلهای ایمنی شروع شده، سپس صفحات کور کننده اصلی واحد بیرون آورده شده و به دلایل ایمنی صفحات کور کننده گاز اسیدی حتی امکان دیرتر بیرون آورده می شوند . دودکش زباله سوز راه اندازی شده و دمای جداره داخلی دودکش مطابق با توصیه های کارخانه سازنده افزایش می یابد . در ضمن دمنده های هوا نیز آزمایش و راه اندازی شده تا بتوانند به موقع هوای لازم محفظه را تامین نمایند .

سیستم توقف اضطراری آزمایش شده و با در سرویس قرار دادن هر وسیله مرحله به مرحله چک می شود . به طور مثال ، سیستم توقف اضطراری دودکش بر اثر دمای زیاد را قبل از راه اندازی زباله سوز بایستی آزمایش نمود . سپس واحد را با استفاده از گاز سوخت حرارت داده تا جداره کوره عمل بیاید . گاز اسیدی با حدود ۲۵ درصد ماکزیمم پس از برداشتن آخرین صفحه کور وارد واحد می شود . شیرهای موجود بر روی لوله های گوگرد به هنگام ورود گاز اسیدی کار کند می بایست شیرها را در فواصل زمانی متفاوت باز و بسته کرد تا پایه های آب بندی گوگرد پر شوند . پس از آنکه گوگرد جریان پیدا کرد در شرایط عادی شیر را باز نگه دارید . اکنون SDS را با ظرفیت پایین چک کرده به طوریکه اگر ایراد و اشتباهی صورت گیرد خوراک دستگاه بدون فرستادن گاز اسیدی به مشعل قطع شود . سرانجام ظرفیت واحد را تا ۵۰ درصد بالا برده بطوریکه کنترل نسبت هوا/گاز اسیدی در سرویس بوده، کوره های گرم کننده با گاز سوخت کار کنند ، میزان هوای تنظیم نهایی توسط تجزیه کننده گاز کنترل شده تا واحد بتواند با بازده مناسب به کار ادامه دهد و به حد اکثر بازیافت گوگرد برسیم .

- پس از راه اندازی اولیه واحد ، میزان هوای اضافی در کوره ها ، نبایستی بیش از ۱۰ درصد باشد .



- قبل از وارد نمودن گاز اسیدی و شروع عمل احتراق ، با سوزاندن گاز سوخت به دماهای عملیاتی زیر باید برسیم :

- ۱- کوره واکنش تقریباً  $800^{\circ}C$
- ۲- کنورتور اول تقریباً  $300^{\circ}C$
- ۳- کنورتور دوم تقریباً  $250^{\circ}C$
- ۴- کنورتور سوم تقریباً  $220^{\circ}C$
- ۵- زباله سوز و دودکش تقریباً  $550^{\circ}C$

در این مرحله تستی بر روی میزان هوا دهی برنرهای زباله سوز انجام پذیرفت که در زیر نتایج آن آورده شده است.

#### ۹-۴ اندازه گیری اثر دمپره‌های کنترل هوا بر دمای داخل زباله سوز

در مرحله پایانی مرحله CURING که دمای استک در 533 درجه سیلسیوس ثابت شده است این تست انجام گرفت در این دما دمپرها در حالت کاملاً باز قرار گرفته اند. در چهار مرحله دمپرها کاملاً بسته شده و تغییرات دما در هر مرحله ثبت شده است. در این دما ( 533 درجه سیلسیوس) شعله کاملاً به رنگ آبی و صدا دار می باشد. از سه ترمومتر با نامهای TT277 در ارتفاع ۸۵۳۴ میلی متری و TT281 در ارتفاع ۱۷۶۷۸ میلی متری و TT285 در ارتفاع ۸۸۳۹ میلی متری دماهای استک خوانده شده است. دبی گاز توسط کنترل ولو F1209 کنترل می شود. دمای شات دان استگ از روی ترمومتر TT281 خوانده می شود. وقتی اهرم دمپرها به سمت بیرون کشیده می شود دمپرها بسته می شوند. برای همین منظور اهرم به چهار قسمت تقسیم شده است و با هر بار کشیدن اهرم، ۲۵ درصد دمپرها بسته می شود. برای اینکه دما کنترل شده تر باشد، دمپرها به ترتیب بسته می شود یعنی اول دمپر برنر ۱ بیست و پنج درصد بسته می شود و بعد از ثابت شدن دما و ثبت آن سراغ برنر دوم و سپس سوم می رویم. دبی گاز در ابتدای آزمایش برای هر سه برنر ۱۱۶۵ متر مکعب می باشد. در شکل ۹-۱ وسایل اندازه گیری و نمایی از محل نصب مشعلهای زباله سوز و دمپر هوا نشان داده شده است. محل مکش هوا به سمت داخل زباله سوز، از رینگ خارجی

است که در شکل مشاهده می شود. افت فشار این مسیر نقش موثری در دبی هوای مکیده شده به داخل زباله سوز دارد.



شکل ۹-۱ نمایی از محل نصب مشعل زباله سوز و سیستمهای اندازه گیری

در جدول ۹-۱ نتایج بدست آمده از تغییر دمپر هوای هر مشعل، آورده شده است. در شرایط پایدار اولیه که دمپر هوا کاملاً باز می باشد، به ازای دبی گاز ۱۱۶۵، دمای محیط ۱۶ و دمای گاز ۳۸ درجه سانتیگراد، دمای اندازه گیری شده در ارتفاع حدود ۱۸ متر (TT281) ۴۹۵/۸ می باشد. همانطور که مشاهده می شود با سه دمپر ۲۵٪ بسته، دما به ۵۳۱ درجه و با سه دمپر ۵۰٪ بسته، دما به ۶۰۵ درجه سانتیگراد می رسد. دمای نهایی با سه دمپر ۷۵٪ بسته به ۶۹۴ درجه می رسد. نتایج اندازه گیری نشان می دهد وضعیت فعلی مشعل، احتراق با هوای بسیار زیاده از حد استکیومتریکی می باشد. با توجه به مقدار زیاد هوا، اندازه گیری غلظت گونه های واکنش غیر ممکن بوده و دستگاههای اندازه گیری، بیش از ۹۹٪ گاز خروجی از دودکش را، هوا نشان می دهد. شکل ۹-۲ بخشی از فرآیند نمونه گیری از گازهای استک برای تست در آزمایشگاه نشان داده شده است.

جدول ۹-۱- نتایج تست تغییر دمپر هوا در دبی گاز ۱۱۶۵ مترمکعب (تست مرحله اول)

ردیف	شرح	دبی گاز (متر مکعب)	دمای محیط (°C)	دمای گاز (°C)	ساعت تست	وضعیت دمپر	دمای زباله سوز		
							TT277	TT285	TT281
۱	برنر ۱	۱۱۶۵	۱۶	۳۸	۹:۰۰	کاملاً باز	۵۳۳.۴	۵۳۰.۲	۴۹۵.۸
۲	برنر ۲	۱۱۶۵	۱۶	۳۸	۹:۰۰	کاملاً باز	۵۳۳.۴	۵۳۰.۲	۴۹۵.۸
۳	برنر ۳	۱۱۶۵	۱۶	۳۸	۹:۰۰	کاملاً باز	۵۳۳.۴	۵۳۰.۲	۴۹۵.۸
۴	برنر ۱	۱۱۶۵	۱۶	۳۸	۹:۱۳	۲۵٪ بسته شد	۵۲۸.۹	۵۲۵.۳	۵۰۱.۳۵
۵	برنر ۲	۱۱۶۵	۱۶	۳۸	۹:۲۴	۲۵٪ بسته شد	۵۵۰.۷	۵۴۷	۵۱۸.۴
۶	برنر ۳	۱۱۶۵	۱۷	۳۸	۹:۳۴	۲۵٪ بسته شد	۵۶۷.۴	۵۶۳.۴	۵۳۱.۶
۷	برنر ۱	۱۱۶۵	۱۷	۳۸	۹:۴۶	۵۰٪ بسته شد	۵۶۸.۷	۵۶۴	۵۴۵.۵
۸	برنر ۲	۱۱۶۵	۱۷	۳۸	۱۰:۰۰	۵۰٪ بسته شد	۵۸۹.۸	۵۸۴.۷	۵۶۸.۶
۹	برنر ۳	۱۱۶۵	۱۷	۳۸	۱۰:۱۹	۵۰٪ بسته شد	۶۴۴.۵	۶۳۷.۸	۶۰۵.۱
۱۰	برنر ۱	۱۱۶۵	۱۷	۳۸	۱۰:۳۳	۷۵٪ بسته شد	۶۷۳.۱۳	۶۶۹	۶۳۵.۳
۱۱	برنر ۲	۱۱۶۵	۱۷	۳۸	۱۰:۴۵	۷۵٪ بسته شد	۷۰۲.۶	۷۰۰	۶۵۸.۴
۱۲	برنر ۳	۱۱۶۵	۱۸	۳۸	۱۰:۵۷	۷۵٪ بسته شد	۷۴۰.۸	۷۳۶.۳	۶۹۴
۱۳	برنر ۱	۱۱۶۵	۱۸	۳۸	۱۰:۵۸	کاملاً بسته شد	۷۵۰.۳	۷۴۴.۷	۷۰۰

توضیحات: با بسته شدن دمپرها (از سه وع ۲۵٪) رنگ شعله بتدریج از آبی به زرد تغییر رنگ داد. زمانیکه دمپرها کاملاً بسته شد رنگ شعله بطور کلی زرد شد.



شکل ۹-۲- نمونه گیری از گازهای استک

با توجه به اینکه در این زمان به دمای شات دان استک ( 800 درجه سلسیوس ) نزدیک شدیم به ناچار دبی گاز به اندازه ۲۳۵ متر مکعب کاهش یافته تا از حالت شات دان استک خارج شده و مرحله دوم تست انجام گردد. با کاهش دبی گاز، دمای استک نیز کاهش یافته و دمپرها بطور کامل بسته می شوند. در این حالت کمترین میزان هوا وارد محفظه احتراق می شود، اما با توجه به عدم امکان اندازه گیری درصد اکسیژن دودکش، تخمین دقیقی از میزان دبی هوا نمی توان گفت، اما با توجه به افزایش دما، با کاهش میزان سوخت، نشان دهنده افزایش میزان هوای احتراق می باشد. در صورت کمبود هوا، بدلیل احتراق ناقص و

خروج هیدروکربنهای نسوخته و CO، بستن دمپرها می بایست سبب کاهش دمای گردند. در جدول ۹-۲ نتایج دمای استک را در دبی گاز ۹۳۰ متر مکعب و دمپهای کاملا بسته نشان می دهد.

جدول ۹-۲- نتایج تست تغییر دمپر هوا در دبی گاز ۹۳۰ مترمکعب (تست مرحله دوم)

دمای زباله سوز			وضعیت دمپر	تاریخ	ساعت رکورد	ساعت تست	دمای گاز (°C)	دمای محیط (°C)	دبی گاز (متر مکعب)	شرح	ردیف
TT277	TT285	TT281									
۶۸۷.۹	۶۸۵.۱	۶۵۷.۱	کاملا بسته	۹۱/۸/۱۴	۱۷:۵۲	۱۱:۱۵	۳۸	۱۸	۹۳۰	برنر ۱	۱
۶۹۵	۶۹۰.۹	۶۶۴.۷	کاملا بسته	۹۱/۸/۱۴	۱۸:۰۴	۱۱:۲۷	۳۸	۱۸	۹۳۰	برنر ۲	۲
۷۵۲.۲	۷۴۵	۷۰۰	کاملا بسته	۹۱/۸/۱۴	۱۸:۱۰	۱۱:۳۲	۳۸	۱۸	۹۳۰	برنر ۳	۳

در این زمان دوباره به دمای شات دان نزدیک شدیم و نیاز به کاهش دبی گاز به میزان ۱۷۷ متر مکعب می باشد. نتایج در جدول ۹-۳ آورده شده است.

جدول ۹-۳- نتایج تست تغییر دمپر هوا در دبی گاز ۷۵۳ مترمکعب (تست مرحله سوم)

دمای زباله سوز			وضعیت دمپر	تاریخ	ساعت رکورد	ساعت تست	دمای گاز (°C)	دمای محیط (°C)	دبی گاز	شرح	ردیف
TT277	TT285	TT281									
۶۸۵.۵	۶۸۱.۶	۶۶۰.۲	کاملا بسته	۹۱/۸/۱۴	۱۸:۲۳	۱۱:۴۵	۳۸	۱۹	۷۵۳	برنر ۳	۱

اکنون دمپهای سه برنر کاملا بسته شده اند و دما ثابت گردیده است. رنگ شعله از آبی به رنگ کاملا زرد تبدیل شده و از صدای برنرها به شدت کم شده است. دمای استک با دمپهای کاملا بسته با میزان دبی گاز ۷۵۳ متر مکعب در وضعیت ۶۸۵.۵ درجه سلسیوس می باشد. حال می خواهیم با دمپهای کاملا بسته به دمای اولیه استک که ۵۳۳.۴ (CURING) بود برسیم. برای رسیدن به این هدف ناچاریم از دبی گاز کم کنیم تا به دمای مورد نظر برسیم. در این حالت میزان صرفه جویی دبی گاز (که گاز طبیعی می باشد) بدست می آید. پس

شروع به کاهش دبی گاز می کنیم. نتایج نشان می دهد در دبی گاز ۵۳۰ متر مکعب، با کاهش ۶۳۰ متر مکعب گاز، به دمای مورد نیاز برای پخت رسیده، که بیش از ۵۰٪ در مصرف گاز صرفه جویی شده است.  
جدول ۹-۴- نتایج تست تغییر دمپر هوا در دبی گاز ۵۳۰ مترمکعب (تست مرحله چهارم)

ردیف	شرح	دبی گاز	دمای محیط (°C)	دمای گاز (°C)	ساعت	تاریخ	وضعیت دمپر	دمای زباله سوز		
								TT277	TT285	TT281
۱	دمپرها بسته	۵۳۰	۲۰	۳۸	۱۲:۲۰	۹۱/۸/۱۴	کاملا بسته	۵۳۰.۱	۵۲۸.۶	۵۳۳.۷

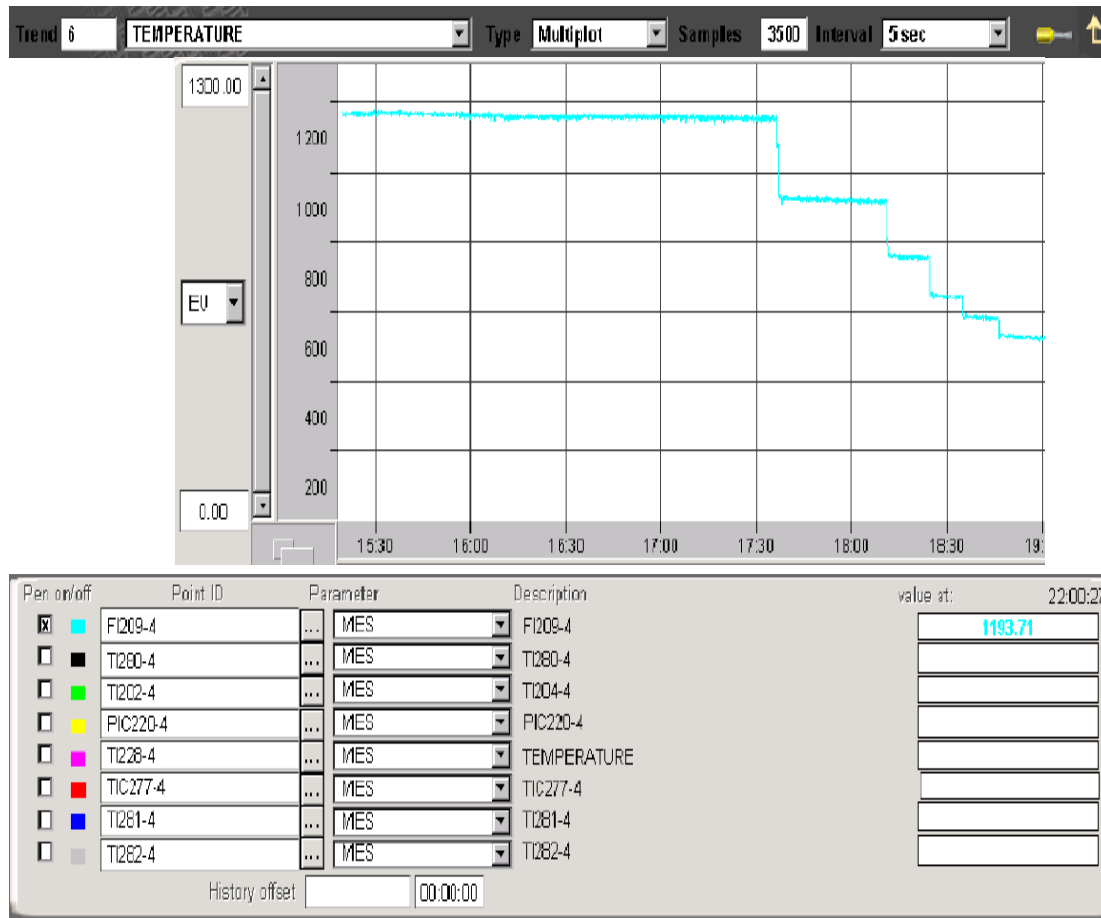
برای کاهش انتشار CO ( و از بین رفتن رنگ زرد شعله) می بایست سیستم اختلاط سوخت و هوا را بهبود بخشید.

#### ۵-۹ نتیجه گیری:

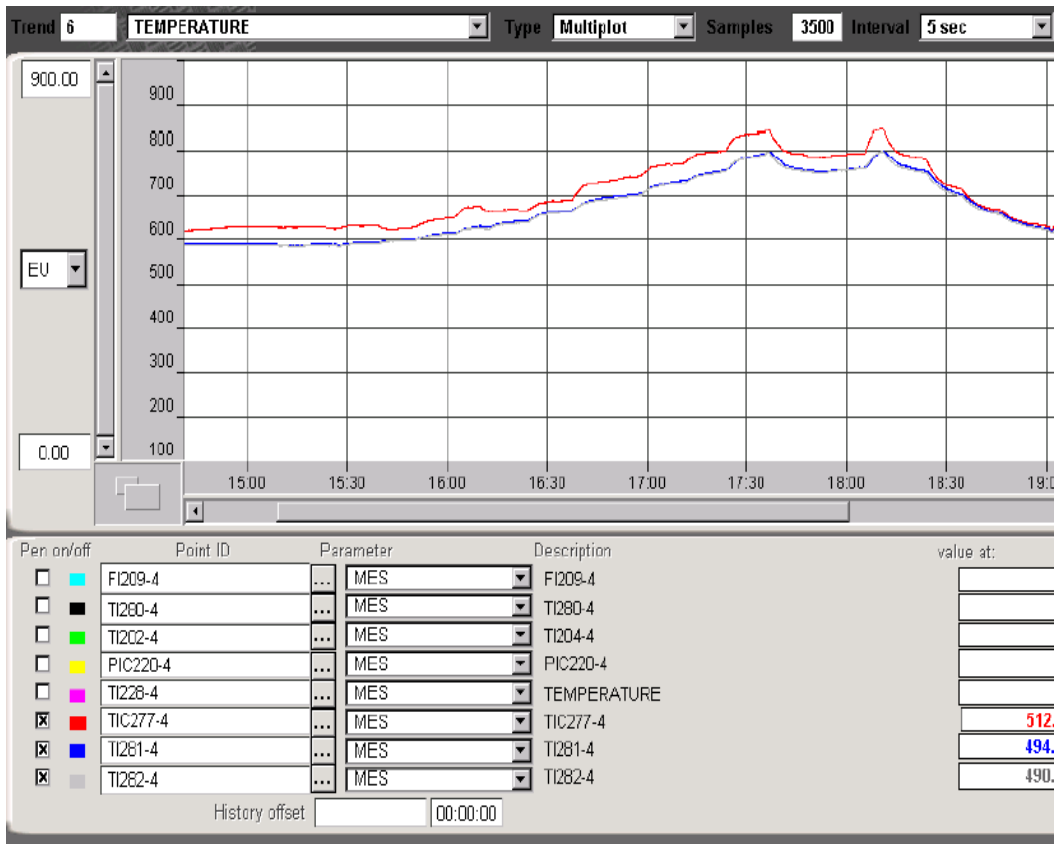
- ۱- مشاهده کردیم با کاهش دبی گاز تا ۵۳۰ متر مکعب با دمپرها کاملاً بسته ( یعنی به اندازه ۶۳۵ مترمکعب) که میزان قابل ملاحظه ای می باشد توانستیم به دمای CURING عملیاتی برسیم که این می تواند صرفه جویی قابل ملاحظه ای باشد.
- ۲- این تست نشان می دهد در مرحله CURING که از گاز طبیعی برای آماده سازی استک استفاده می شود میزان هوا دهی به شعله زیاد است و ما دارای هوای اضافی می باشیم و باعث سرد شدن شعله و در نتیجه کاهش دمای نهایی استک می شود.
- ۳- نمودارهای حاصل از تست انجام شده در زیر آورده شده است این نمودارها خروجی اتاق کنترل می باشد. لازم به توضیح می باشد ساعت رکورد در اتاق کنترل با ساعت انجام تست همخوانی نداشت .
- ۴- بعد از پایان تست دوباره به تدریج دمپرها باز و دما کنترل گردید تا استک به حالت قبل از تست برگشته و آماده دریافت گاز اسیدی باشد.

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران

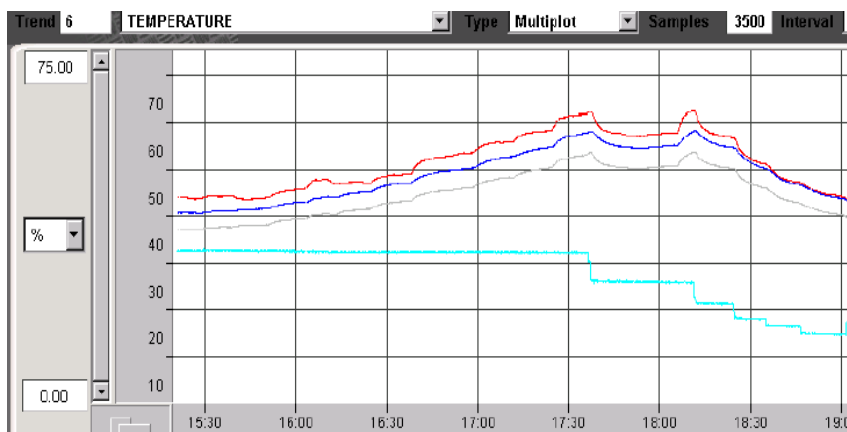


شکل ۹-۲- روند تغییرات دبی گاز ثبت شده توسط سیستم کنترل ولو F1209 در طول زمان تست



شکل ۹-۳- روند تغییرات دمای گاز ثبت شده توسط سیستم ترمومترهای TT277, TT281, TT282 در طول زمان

#### تست



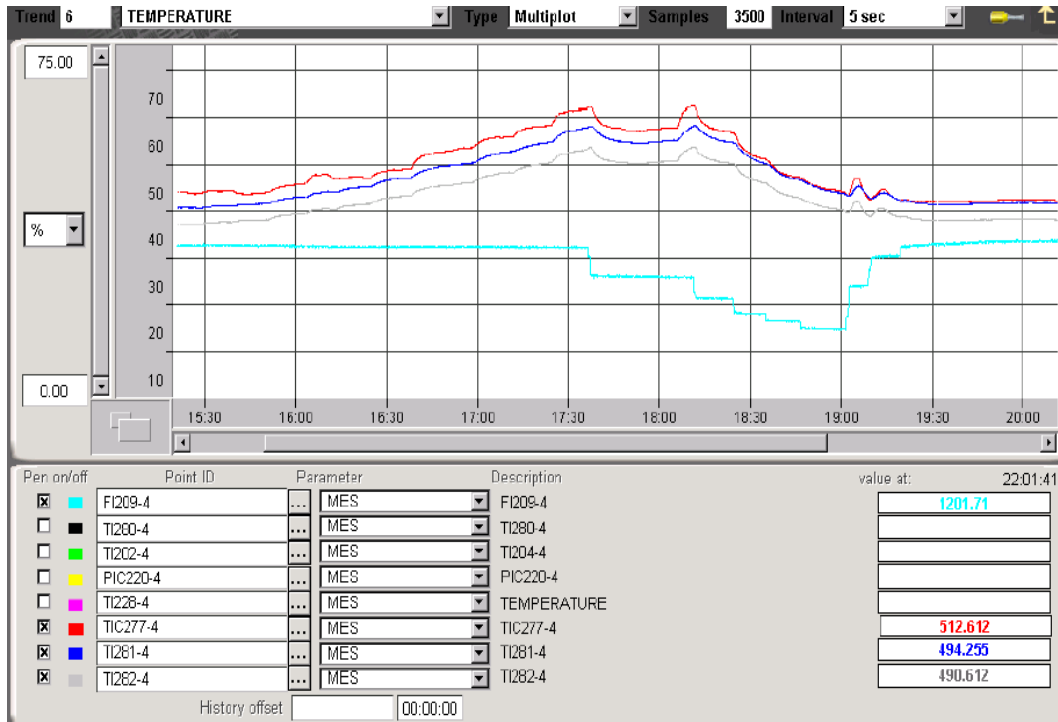
شکل ۹-۴- روند درصد تغییرات دبی گاز ثبت شده و دمای استک در حالت بدون بعد در طول زمان تست

تا مرحله دمپهای کاملاً بسته (مرحله ۳)



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران



شکل ۹-۵- روند درصد تغییرات دبی گاز ثبت شده و دمای استک در حالت بدون بعد در طول زمان تست جهت

رسیدن به دمای شروع تست با مرحله دمپهای کاملاً بسته (پایان مرحله ۴)

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیان



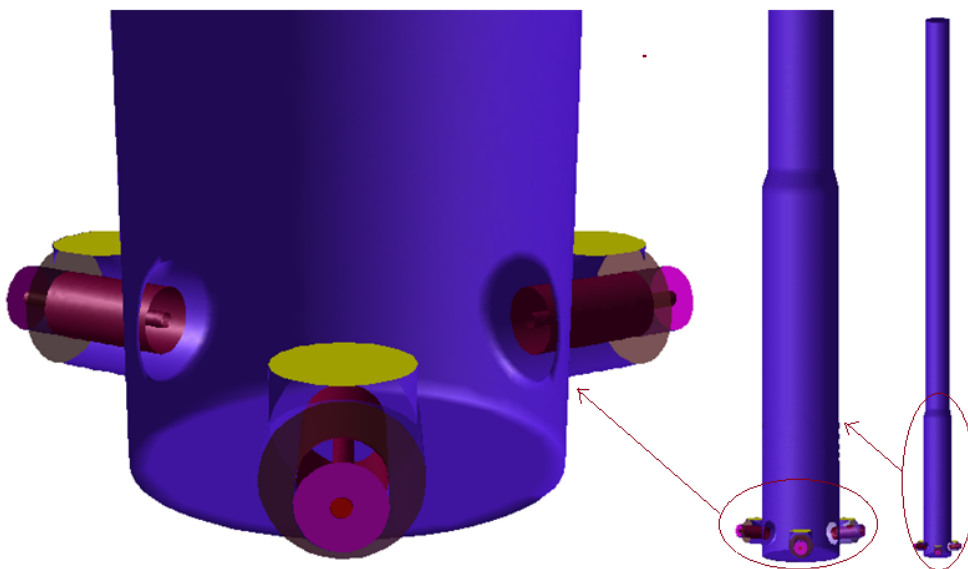
## بخش ۲

**۲- بررسی اثر میزان هوای ورودی در فرآیند پخت (Curing) زباله سوز**

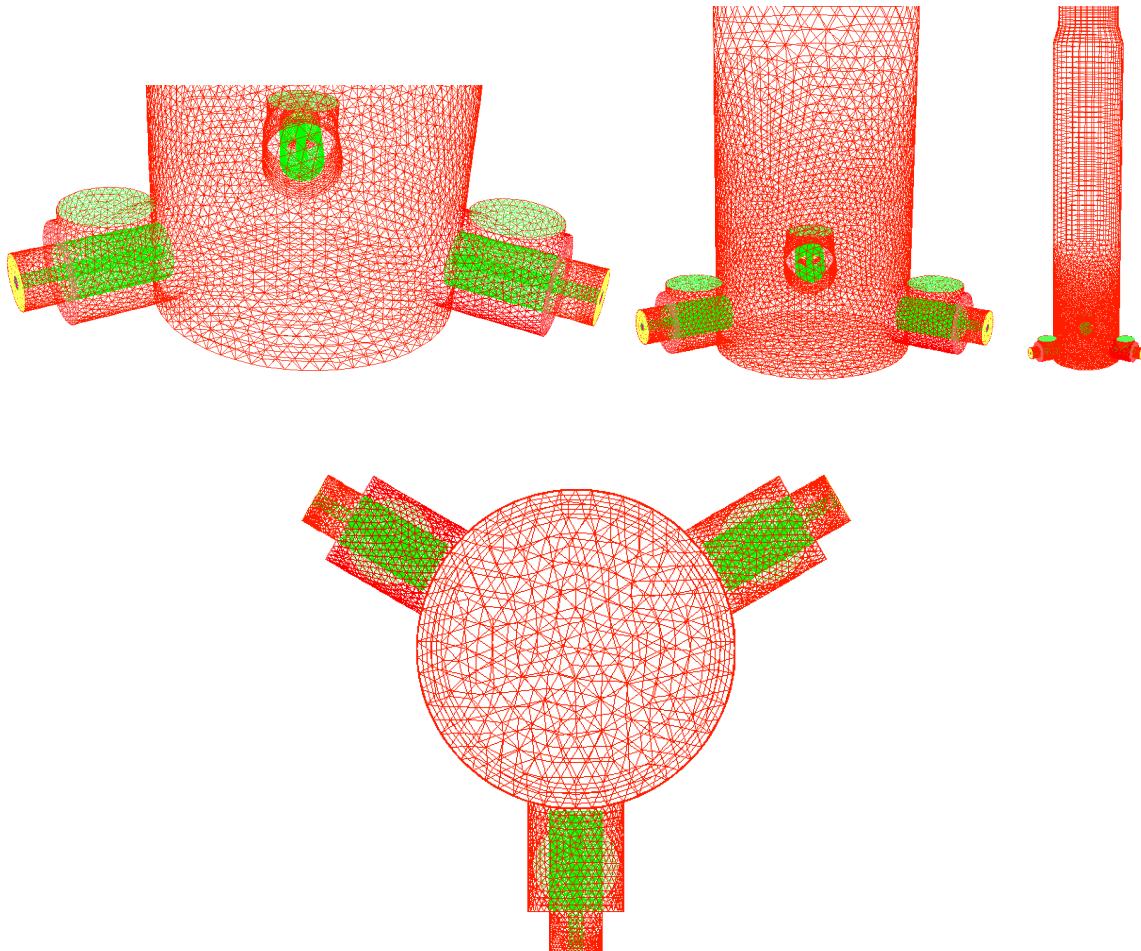
**واحد ۴ بازیافت گوگرد با استفاده از شبیه سازی عددی**

## مقدمه

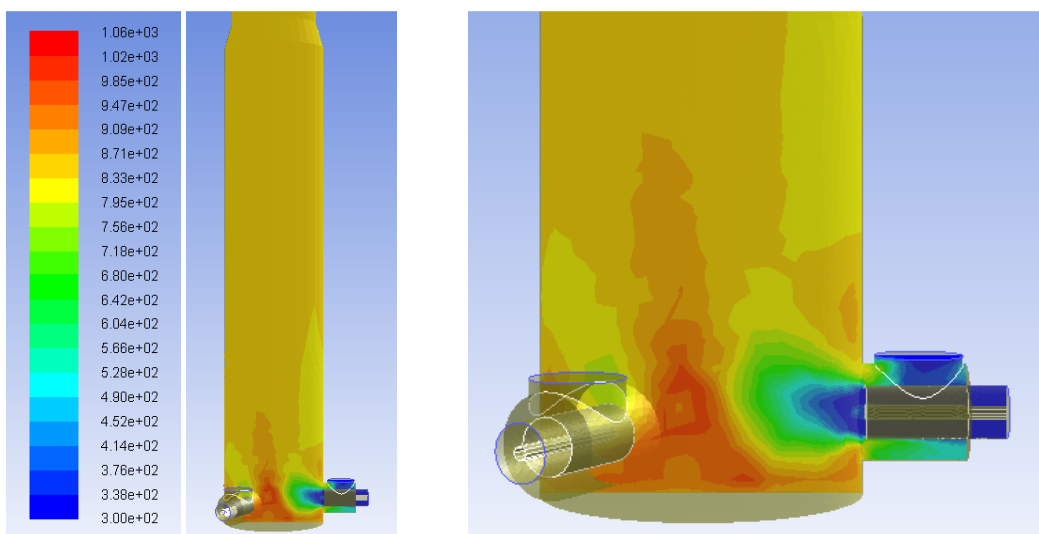
در شبیه سازی عددی، شناخت دقیق پدیده تاثیر زیادی بر تنظیمات حل و دقت نتایج بدست آمده دارد. در زباله سوزهای واحدهای بازیافت گوگرد پالایشگاه خانگیران، هوای احتراق از طریق خاصیت دودکشی برج و بصورت مکش طبیعی می باشد. لذا دبی هوای مکشی، که بعنوان یک عامل اصلی واکنشها در اینجا مورد بررسی است، وابستگی زیادی به دما و چگالی هوای محیط، ارتفاع برج، توزیع دمای داخل برج و افت فشار مسیر دارد. لذا پارامترهای فوق می بایست به دقت وارد محاسبات گردد تا بتوان نتایج دقیقی بدست آورد. در شکل ۱ هندسه تولید شده برج ( براساس نقشه ها و اطلاعات فنی موجود [۱] ) نشان داده شده است. در جهت نمایش بهتر، علاوه بر نمایش کامل برج، دو نمای بزرگ شده از قسمت پایین برج و مشعلها نیز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بدلیل اهمیت نحوه اختلاط سوخت و هوا بر دمای شعله، دهانه به دقت خوبی مدلسازی شده اند. همچنین بدلیل محاسبه دقیق تر افت فشار مسیر نواخی همگرا و واگرای برج مدلسازی شده است.



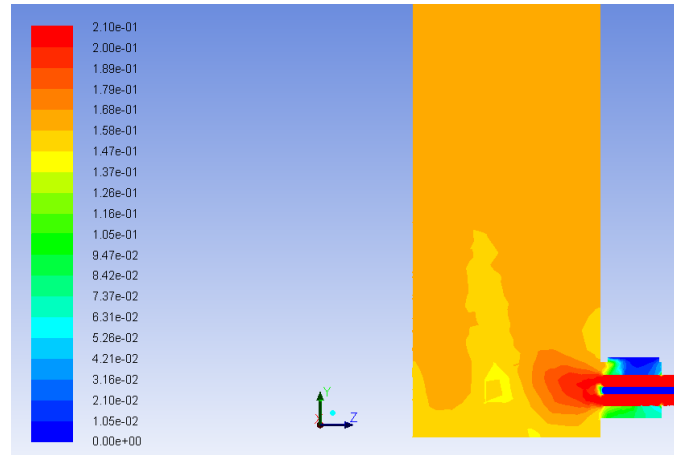
شکل ۹-۶- نمای کلی و دو نمای بزرگ نمایی شده از برج و مشعلهای برج



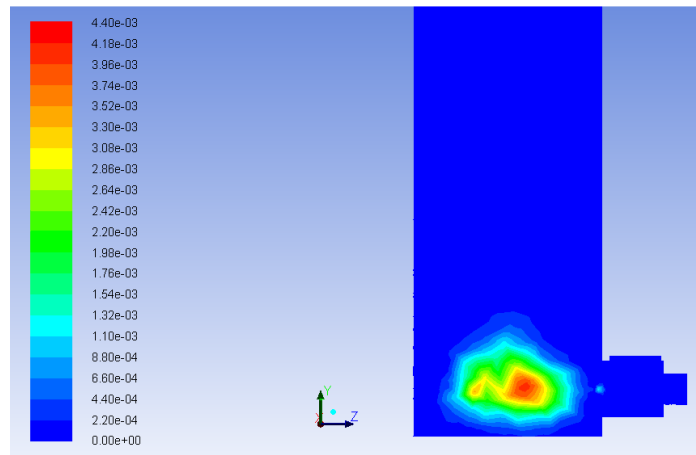
شکل ۹-۷- شبکه بندی محیط حل از نماهای مختلف و شبکه بندی نواحی ورودی و مشعلها



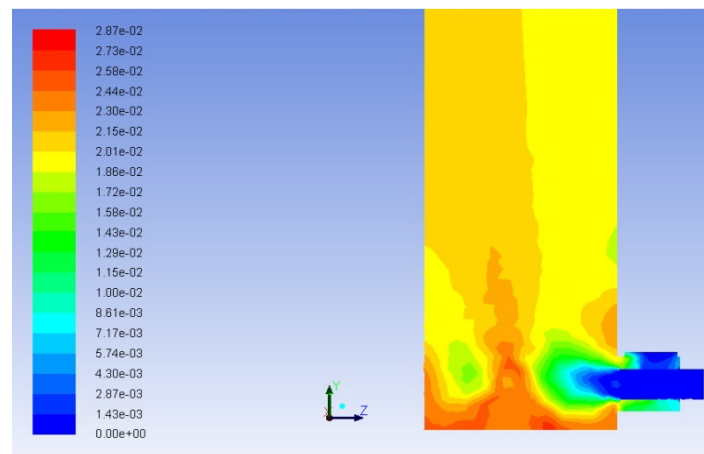
شکل ۹-۸- توزیع دما داخل محفظه برج و بزرگنمایی شده در منطقه مشعلها



الف) توزیع کسر جرمی اکسیژن



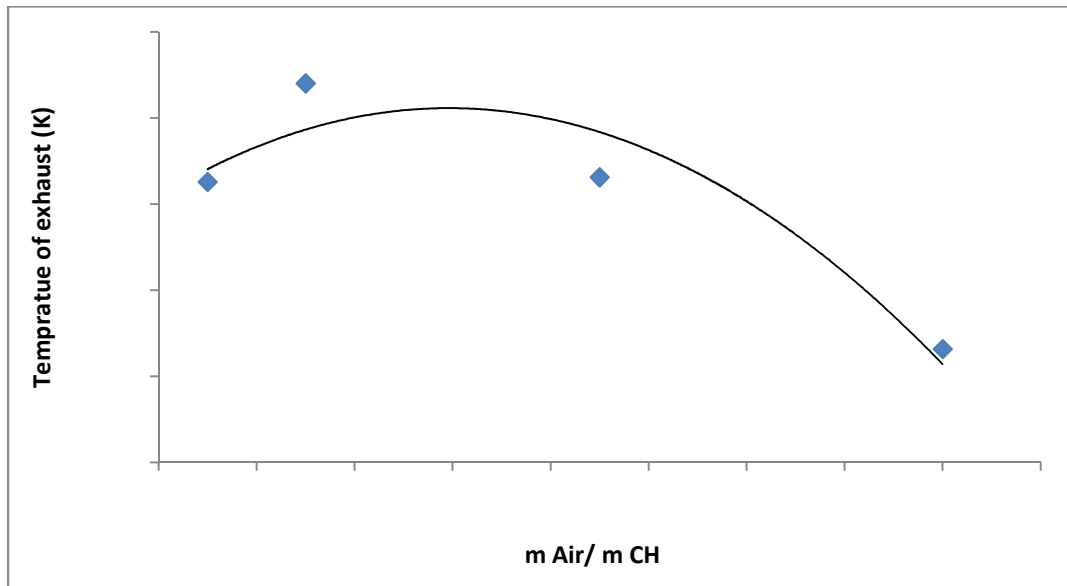
ب) توزیع کسر جرمی CO



ج) توزیع کسر جرمی CO<sub>2</sub>

شکل ۹-۹- توزیع گونه های O<sub>2</sub>، CO<sub>2</sub> و CO در منطقه پایین برج

نتایج نشان می دهد حجم هوای مکشی حدود ۲۰ کیلوگرم بر ثانیه، بیش از ۴ برابر نسبت استکیومتریکی می باشد. نتایج آزمایشگاهی اندازه گیری  $CO_2$  نیز نشان می دهد مقدار  $CO_2$  داخل دودکش بسیار اندک و در حد بسیار کم می باشد.



شکل ۹-۱۰- تغییرات دمای اگزوز بر حسب نسبت دبی هوا به سوخت

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران



نتیجه گیری و جمع بندی



**فصل دهم:**

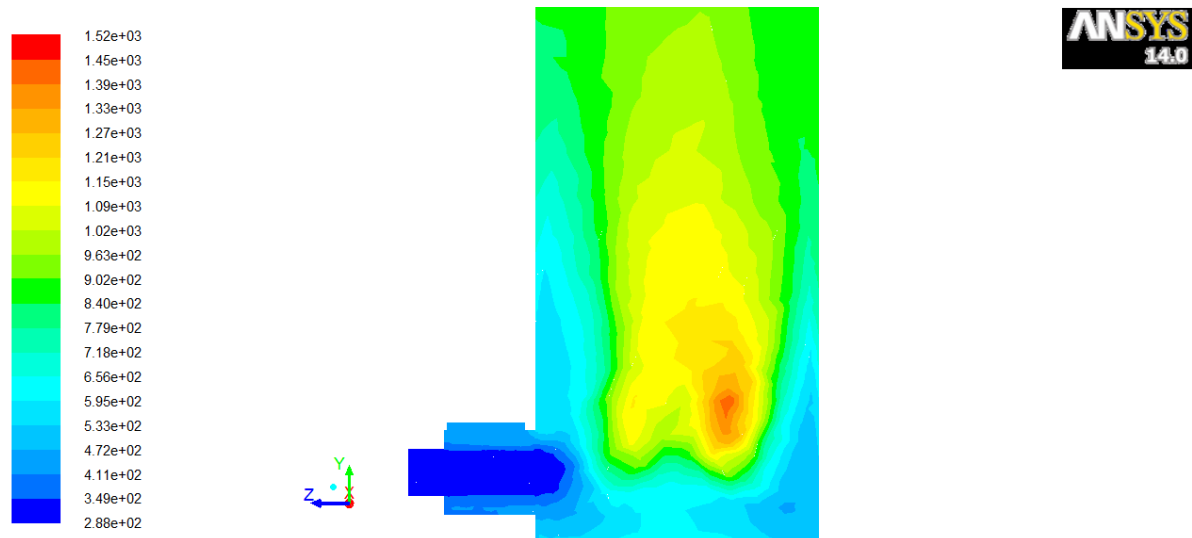
**مطالعه عددی وضعیت عملکردی زباله سوزهای**

**پالایشگاه در شرایط موجود**

### مقدمه

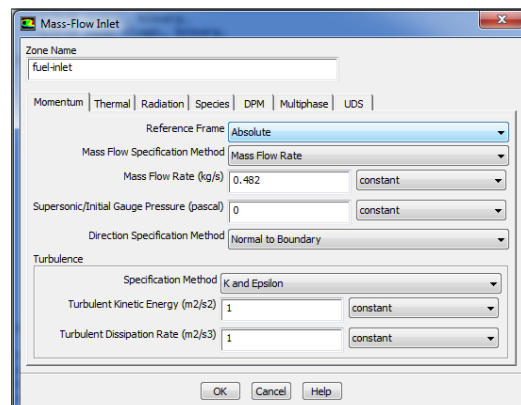
پس از مرحله پخت و راه اندازی زباله سوز، گاز اسیدی وارد زباله سوز می گردد. جهت واکنش گازهای اسیدی، ۳ مشعل راه انداز زباله سوز که با سوخت گاز طبیعی کار می کنند، گرمای مورد نیاز واکنشهای مورد نظر را تامین می کنند. اندازه گیری دمای زباله سوز نشان می دهد با وجودیکه مشعلها در ماکزیمم توان خود در حال کار می باشند، اما دمای زباله سوز به اندازه کافی ( $T < 600^{\circ}C$ ) بالا نمی باشد. لذا در این فصل ابتدا شرایط طراحی زباله سوز را بر اساس مستندات موجود (جدول ۹-۱ و ۹-۲) محاسبه نموده و سپس به تحلیل وضعیت موجود و علل کاهش دمای آن و راههای رفع آن مورد بررسی قرار می گیرد.

### شبیه سازی شرایط طراحی:



Contours of Static Temperature (k)

May 08, 2013  
ANSYS FLUENT 14.0 (3d, pbns, spe, ske)



عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران



Mass-Flow Inlet

Zone Name: air-inlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS

Reference Frame: Absolute

Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate

Mass Flow Rate (kg/s): 17.08 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Direction Specification Method: Normal to Boundary

Turbulence

Specification Method: k and Epsilon

Turbulent Kinetic Energy (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>): 1 constant

Turbulent Dissipation Rate (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>): 1 constant

OK Cancel Help

Mass-Flow Inlet

Zone Name: acid\_gas

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS

Specify Species in Mole Fractions

Species Mass Fractions

o2	0	constant
co2	0.33	constant
co	0	constant
h2o	0.24	constant

OK Cancel Help

Mass-Flow Inlet

Zone Name: acid\_gas

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS

Reference Frame: Absolute

Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate

Mass Flow Rate (kg/s): 25.1 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Direction Specification Method: Normal to Boundary

Turbulence

Specification Method: k and Epsilon

Turbulent Kinetic Energy (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>): 1 constant

Turbulent Dissipation Rate (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>): 1 constant

OK Cancel Help

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران



### مدیریت فلرینگ

شرایط زیاله سوز با استفاده از گاز های فلاش درام یک واحد تصفیه گاز

Wet Composition	TAIL GAS + FLASH DRUM GAS	(Air)	(Fuel)	INCT (Outlet)
H2	0.101676114	0	0	0
Ar	0	0.490202	0	0.490202
O2	0	10.99186	0	3.38057
N2	46.97530746	40.97774	0	87.95304
C1	0.696150303	0	1.905156	0
CO	0.180652425	0	0	0.090326
CO2	36.85995483	0.017304	0	40.63723
C2	0.003144866	0	0.080217	0
H2S	0.254024774	0	0	0
COS	0.113026001	0	0	0
SO2	0.124375895	0	0	0.717479
CS2	0.113026001	0	0	0
H2O	28.77386665	0.444438	0	35.82507
NH3	0	0	0	0
HCN	0	0	0	0
C3	0.000331038	0	0.020054	0
iC4	0	0	0	0
nC4	2.36456E-05	0	0	0
iC5	0	0	0	0
nC5	0	0	0	0
C6+	0.102385469	0	0	0
CH4S	0	0	0	0
C2H6S	0	0	0	0
<b>Total (E3m3/h)</b>	<b>114.2979507</b>	<b>52.92154</b>	<b>2.005428</b>	<b>169.0939</b>
<b>Stream Data</b>				
Temperature (C)	<b>139</b>	15.49999	14.95001	<b>599.9999</b>
Pressure (kPa (g))	-0.689999998	-1.37895	275.7864	-5.69
Enthalpy (GJ/h)	-894.5166016	-5.4528	-6.43702	-906.406
Molecular Weight	30.7449398	28.87522	16.8846	30.00851

عنوان پروژه: بررسی افزایش کارایی مشعلهای پالایشگاه شهید هاشمی نژاد

عنوان فصل: نتایج شبیه سازی احتراق فلر پالایشگاه گاز خانگیران



### مدیریت فلرینگ

شرایط زیاله سوز با استفاده از گاز های فلاش درام یک واحد تصفیه گاز

Wet Composition	TAIL GAS + FLASH DRUM GAS	(Air)	(Fuel)	INCT (Outlet)
H2	0.101676114	0	0	0
Ar	0	0.490202	0	0.490202
O2	0	10.99186	0	3.38057
N2	46.97530746	40.97774	0	87.95304
C1	0.696150303	0	1.905156	0
CO	0.180652425	0	0	0.090326
CO2	36.85995483	0.017304	0	40.63723
C2	0.003144866	0	0.080217	0
H2S	0.254024774	0	0	0
COS	0.113026001	0	0	0
SO2	0.124375895	0	0	0.717479
CS2	0.113026001	0	0	0
H2O	28.77386665	0.444438	0	35.82507
NH3	0	0	0	0
HCN	0	0	0	0
C3	0.000331038	0	0.020054	0
iC4	0	0	0	0
nC4	2.36456E-05	0	0	0
iC5	0	0	0	0
nC5	0	0	0	0
C6+	0.102385469	0	0	0
CH4S	0	0	0	0
C2H6S	0	0	0	0
<b>Total (E3m3/h)</b>	<b>114.2979507</b>	<b>52.92154</b>	<b>2.005428</b>	<b>169.0939</b>
<b>Stream Data</b>				
Temperature (C)	<b>139</b>	15.49999	14.95001	<b>599.9999</b>
Pressure (kPa (g))	-0.689999998	-1.37895	275.7864	-5.69
Enthalpy (GJ/h)	-894.5166016	-5.4528	-6.43702	-906.406
Molecular Weight	30.7449398	28.87522	16.8846	30.00851