



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# Modeling of an Industrial Incinerator for Refinery Wastes and Investigating the Effective Parameters for Performance Improvement

Mohsen Bahoosh <sup>a</sup>, Bahareh Bidar <sup>b</sup>, Mohammad Reza Sardashti Birjandi <sup>b</sup>, Farhad Shahraki <sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> MSc, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

<sup>b</sup> Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

<sup>c</sup> Professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 03 August 2023

Revised: 28 March 2024

Accepted: 28 May 2024

### Keywords:

Incinerator,  
Modeling,  
Natural gas,  
Hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S),  
Performance improvement,  
Computational Fluid Dynamic (CFD).

## ABSTRACT

Industrial waste incinerators in gas refineries or sulfur recovery units are responsible for eliminating the waste gases such as hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) produced in the process. Most of these units are facing problems such as incomplete combustion, lack of proper control systems for measurement, and the presence of pollutants such as carbon monoxide and nitrogen oxides, etc. Therefore, in this research, to improve the performance of the waste incinerator of Fajr Jam Refinery, furnace modeling was done by computational fluid dynamics (CFD). The software Fluent 6.3 is used for the modeling of the incinerator. To achieve this goal, parameters such as the ratio of fuel to air in the inlet duct of main air, the amount and role of the additional air inlet at the bottom of the chimney, the installation of the additional air inlet duct at the end of the furnace for mixing more oxygen and H<sub>2</sub>S, air injection into the inlet duct of acid gas and the feasibility of preheating the incoming air and its effect on the combustion efficiency was investigated. The modeling results showed that increasing the airflow can reduce the amount of CO and H<sub>2</sub>S, but the amount of NO<sub>x</sub> compounds increases. To establish a balance between the output of pollutants from the furnace, solutions to improve the unit performance were presented, and the appropriate flow range of excess air in the furnace was determined.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31428.2510>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding author.

E-mail address: [fsahraki@eng.usb.ac.ir](mailto:fsahraki@eng.usb.ac.ir)

## How to cite this article:

Bahoosh, M., Bidar, B., Sardashti Birjandi, M. R., & Shahraki, F. (2024). Modeling of an Industrial Incinerator for Refinery Wastes and Investigating the Effective Parameters for Performance Improvement. Journal of Modeling in Engineering, 22(78), 103-122. doi: 10.22075/jme.2024.31428.2510

# مدل سازی زباله سوز صنعتی جهت پسماندهای پالایشگاه و بررسی پارامترهای مؤثر بر بهبود عملکرد

محسن باهوش<sup>۱</sup>، بهاره بیدار<sup>۲</sup>، محمدرضا سردشتی بیرجندی<sup>۳</sup>، فرهاد شهرکی<sup>۳\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲	<p>زباله سوزهای صنعتی در پالایشگاههای گاز یا در واحدهای بازیابی گوگرد، وظیفه از بین بردن گازهای زائد تولید شده در فرآیند نظیر سولفید هیدروژن (<math>H_2S</math>) و دی اکسید کربن (<math>CO_2</math>) را بر عهده دارند. اغلب این واحدها با مشکلاتی نظیر سوختن ناقص، نبود سیستم کنترلی مناسب برای اندازه گیری و وجود آلایندههایی مانند مونوکسید کربن و اکسیدهای ازت و غیره، روبه رو هستند. لذا در این پژوهش، به منظور بهبود عملکرد زباله سوز پالایشگاه فجر جم، مدل سازی کوره به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام گردید. از نرم افزار Fluent 6.3 برای مدل سازی زباله سوز استفاده شده است. برای رسیدن به این هدف، پارامترهایی همچون نسبت سوخت به هوا در مجرای اصلی ورود هوا، میزان و نقش هوای اضافی ورودی در پایین دودکش، تعبیه مجرای اضافی ورود هوا در انتهای کوره برای اختلاط بیشتر اکسیژن و <math>H_2S</math>، تزریق هوا به مجرای ورودی گازهای اسیدی و امکان سنجی پیش گرم کردن هوای ورودی و تأثیر آن بر روی بازدهی احتراق، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل سازی نشان داد که افزایش دبی هوا می تواند میزان <math>CO</math> و <math>H_2S</math> را کاهش دهد، اما میزان ترکیبهای <math>NOx</math> افزایش می یابد. به منظور برقراری تعادل بین میزان خروجی آلایندهها از کوره، راه کارهایی برای بهبود عملکرد واحد ارائه شده و محدوده دبی مناسب هوای اضافی در کوره مشخص گردید.</p>
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۰۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸	
<p><b>واژگان کلیدی:</b>            زباله سوز صنعتی،            مدل سازی،            گاز طبیعی،            سولفید هیدروژن (<math>H_2S</math>)،            بهبود عملکرد،            دینامیک سیالات محاسباتی (CFD).</p>	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31428.2510>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## ۱- مقدمه<sup>۱</sup>

تصفیه، ذخیره سازی، دفع و سایر فرآیندهای مدیریت زباله توسعه یافته است. هر روشی دارای نقاط قوت و ضعف، کاربردی بودن و از همه مهمتر قابلیت های متفاوت در رفع نیازهای خود است. سوزاندن زباله یک فناوری اثبات شده برای زباله های شهری، صنعتی، بیمارستانی است. نوع زباله، محتوای زباله (درصد کربن، هیدروژن، گوگرد، کلر و اکسیژن)، میزان ضایعات، رده خطر، نرخ رطوبت، ارزش

رشد جمعیت، تقاضای انرژی، فعالیت های صنعتی و سایر پیشرفت های فناوری ناگزیر منجر به تولید زباله های خطرناک<sup>۲</sup> (HW) می شود. مشخص شده است که روش های سنتی جمع آوری، حمل و نقل و دفع زباله برای پیشگیری از مشکلات بهداشتی و ایجاد آسیب های اقتصادی و زیست محیطی کافی نیست. فن آوری های زیادی برای

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fshahraki@eng.usb.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲ Hazardous waste

۲. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه

سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

استناد به این مقاله:

باهوش، محسن، بیدار، بهاره، سردشتی بیرجندی، محمدرضا، و شهرکی، فرهاد. (۱۴۰۳). مدل سازی زباله سوز صنعتی جهت پسماندهای پالایشگاه و بررسی پارامترهای مؤثر بر بهبود عملکرد. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۸)، ۱۰۳-۱۲۲. doi: 10.22075/jme.2024.31428.2510

بهینه‌سازی آن‌ها پرداخته باشد، وجود ندارد؛ اما با توجه به تشابه سیستم واکنشی زباله‌سوز و کوره آن با فرآیند کلاوس<sup>۵</sup>، می‌توان از این فرآیند استفاده نمود. فرآیند کلاوس، یک فرآیند احتراقی پرسوخت است که در آن  $H_2S$  به  $S_2$  تبدیل می‌شود. فرآیندی که در زباله‌سوز رخ می‌دهد یک فرآیند کم سوخت محسوب می‌گردد که در آن  $H_2S$  با هوای اضافی بهینه می‌سوزد و به  $SO_2$  و ترکیبات دیگری نظیر  $SO_3$  تبدیل می‌شود [۹]. پژوهش‌های مختلفی در زمینه بررسی ساختار شعله سولفید هیدروژن ( $H_2S$ ) / هوای طی فرآیند کلاوس، هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی، انجام شده است. آراتیان و همکاران [۱۰] رفتار هیدروژن سولفید، کربن دی سولفید و کربونیل سولفید را در فشار پایین به وسیله کروماتوگرافی و تکنیک تشدید حرکت دورانی الکترون‌ها مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اولین مرحله تشکیل  $H_2S$ ، شامل تشکیل  $H_2$ ،  $SO_2$  و  $SO$  است و حضور  $H_2S$  مانع اکسایش  $H_2$  می‌گردد. در مرحله دوم، اکسایش هیدروژن با تشکیل گروه‌های رادیکالی هیدروکسیل، همراه می‌شود.

مولر و همکاران [۱۱] شیمی سولفور را در شعله پرسوخت  $H_2/O_2/N_2$  با  $0/25$ ،  $0/5$  و یک درصد هیدروژن سولفید بررسی کردند. آن‌ها غلظت  $SO$ ،  $SO_2$ ،  $S_2$ ،  $SH$  و  $OH$  را با استفاده از اندازه‌گیری‌های کمی لیزرهای فلئورسنت اندازه گرفتند. با به‌کارگیری این روش آن‌ها توانستند بسیاری از پارامترهای سینتیکی برای گونه‌های میانی واکنش سولفور را محاسبه کنند.

فرانکلچ و همکاران [۱۲] فرآیند اشتعال با تأخیر اکسایش هیدروژن سولفید را با استفاده از لوله‌ای با امواج ضربه‌ای بازتابشی به صورت عددی و تجربی و با در نظر گرفتن سیستمی همراه با  $57$  واکنش مورد بررسی قرار دادند. برنز-کمبات و همکاران [۱۳] ساختار شعله سولفید هیدروژن / هوای را به صورت تجربی تحت شرایط کلاوس مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها شعله را به سه ناحیه مجزا تقسیم کردند. در ناحیه اول، هیدروژن سولفید به وسیله حرارت و واکنش تجزیه می‌گردد و هیدروژن محصول غالب این قسمت است. در ناحیه دوم، هیدروژن سولفید و هیدروژن به وجود آمده در مرحله نخست، اکسید گردیده و در ناحیه سوم، بخشی از هیدروژن مصرف شده و مقداری گوگرد تولید می‌شود.

حرارتی، درصد ترکیبات آلی/غیر آلی، نوع سوخت مورد استفاده برای احتراق و استانداردهای ملی و بین‌المللی مورد استفاده برای انتشار، پارامترهای اصلی طراحی سیستم‌های زباله‌سوز<sup>۳</sup> هستند [۲ و ۱].

به‌طور کلی هر فرآیندی که بتواند با سوزاندن مواد زائد جامد، مایع یا گاز، حجم یا وزن آن‌ها را کاهش بدهد و به موادی با آلاینده‌گی کمتر تبدیل کند، زباله‌سوزی نامیده می‌شود. در صورتی که کوره زباله‌سوز به خوبی طراحی و ساخته شود و به طرز صحیحی مورد بهره‌برداری واقع گردد، مسئله دفع زباله‌های قابل احتراق را حل خواهد کرد [۳ و ۴].

به همین جهت یکی از متداول‌ترین روش‌های انتخاب شده به منظور مدیریت زباله برای مواد غیرقابل بازیابی نظیر گازهای خروجی دودکش در پالایشگاه‌های گاز یا در واحدهای بازیابی گوگرد<sup>۴</sup> (SRU) نیز استفاده از زباله‌سوزها می‌باشد. هدف اصلی اینگونه زباله‌سوزها، سوزاندن و اکسیدکردن کلیه ترکیبات خطرناک نظیر گوگرد عنصری و ترکیبات گوگردی شامل  $CS_2$ ،  $H_2S$ ،  $COS$  و ... و تبدیل آن‌ها به  $SO_2$  می‌باشد، به‌طوری‌که حداکثر مجاز این ترکیبات در خروجی دودکش زباله‌سوز از میزان استانداردهای زیست‌محیطی تجاوز نکند. بنابراین زباله سوزهای صنعتی نقش حیاتی در دفع زباله ایفا می‌کنند، لذا عملیات آن‌ها پیامدهای زیست‌محیطی و عملکردی قابل توجهی دارد [۵-۷].

زباله‌سوز را می‌توان به‌عنوان یک کوره که در آن زباله سوزانده می‌شود، تصور کرد. زباله‌سوزها خود به دو نوع زباله‌سوزهای متعارف و زباله‌سوزهای ابداعی تقسیم می‌شوند. با توجه به سیستم واکنشی، زباله‌سوزهای متعارف را می‌توان به چهار نوع بستر ثابت، کوره دوار، بسترسیال و زباله‌سوزهای با تزریق مایع تقسیم نمود. زباله‌سوزهای ابداعی دسته‌ای از زباله‌سوزها هستند که با توجه به نیاز مشتری و بازار هدف، با ویژگی‌های خاص طراحی و ساخته می‌شوند. زباله‌سوزهای مدرن به سیستم‌های بهبود آلودگی‌های زیست‌محیطی مجهز شده‌اند که نقش خود را در تصفیه کردن گاز دودکش و سایر مواد سمی ایفا می‌کنند [۸].

از آنجایی‌که زباله‌سوزهای ابداعی به‌صورت اختصاصی ساخته می‌شوند، پژوهشی که به‌طور مستقیم به بررسی احتراق و

<sup>5</sup> Claus

<sup>3</sup> Waste incineration syst hazardous wasteems

<sup>4</sup> Sulfur Recovery Unit

تعدیل‌کننده<sup>۶</sup> می‌توان بازده کوره را افزایش داد و از میزان ترکیبات NO<sub>x</sub> خروجی کاست.

لیو و همکاران [۲۳] تأثیر نسبت‌های متفاوت هوای اضافی در کوره را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت هوای اضافی، دمای گاز، محتوای کربن در خاکستر معلق و همچنین غلظت O<sub>2</sub> افزایش می‌یابد، اما میزان ترکیبات NO<sub>x</sub> در خروجی کوره به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

فردویی و همکاران [۲۴] بررسی جامعی بر روی ویژگی‌های مختلف احتراق غنی شده با اکسیژن و اکسی متان به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام دادند. آن‌ها میزان انتقال حرارت، تأخیر احتراق، رنگ شعله، ساختار شعله، انتشار CO و NO<sub>x</sub> (به‌عنوان آلاینده‌های هوا) را با افزودن CO<sub>2</sub> به اکسیدکننده کوره با استفاده از مدل تلاطم استاندارد k-ε و مکانیزم شیمیایی دقیق GRI2.11 مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل‌سازی CFD نشان داد که با جایگزینی CO<sub>2</sub> با N<sub>2</sub>، حداکثر دما تا رسیدن شعله به قسمت نازل شکل کوره به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مشخص گردید که احتراق غنی شده با اکسیژن و اکسی متان مزایایی نظیر افزایش یکنواختی دما و کاهش قابل توجه انتشار ترکیبات NO<sub>x</sub> نسبت به احتراق متان به همراه هوای کم دارد.

سیگال و همکاران [۲۵] به مطالعه کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن از دیگ‌های بخار با احتراق سوخت‌های گازی پرداختند. با هدف کاهش انتشار NO<sub>x</sub> در گازهای حاصل از احتراق، از گردش مجدد گازهای دودکش در هوای دمیده استفاده کردند. با این روش انتشار NO<sub>x</sub> در حدود ۶۷ درصد کاهش پیدا کرد.

جیانگ و همکاران [۲۶] از رویکرد احتراق مرحله‌ای هوای اضافی در دیگ‌های بخار استفاده کردند. به منظور دستیابی به توزیع میدان جریان، ویژگی‌های احتراق و تعیین میزان انتشار NO<sub>x</sub>، نسبت‌های مختلف هوای اضافی طی آزمایش‌های طبقه‌بندی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ جریان هوای اضافی نسبت‌های استوکیومتری ناحیه مشعل کاهش می‌یابد که پارامتر مهمی است. آن‌ها نشان دادند که ویژگی‌های احتراق در مقایسه با یک طرح بدون مرحله‌بندی هوای اضافی بهبود بخشیده شده است.

سلیم و همکاران سینتیک شیمیایی احتراق H<sub>2</sub>S را در شرایط تجربی مختلفی مورد بررسی قرار دادند [۱۷-۱۴]. آن‌ها در یکی از این پژوهش‌ها [۱۴] احتراق H<sub>2</sub>S را در شعله متان/هوا و تحت نرخ‌های تعادلی مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که در حضور اکسیژن، H<sub>2</sub>S تمایل بیشتری برای تبدیل به SO<sub>2</sub> نسبت به S<sub>2</sub> دارد. سلیم و همکاران در پژوهش دیگری [۱۵] تأثیر ترکیب جریان گازهای اسیدی بر روی بازیابی سولفور را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه تجربی نشان داد که حضور دی‌اکسیدکربن سبب کاهش بازیابی سولفور می‌شود و H<sub>2</sub>S در این شرایط تمایل بیشتری تبدیل شدن به SO<sub>2</sub> دارد. از سوی دیگر دریافتند که N<sub>2</sub> تأثیری بر روی میزان بازیابی سولفور ایجاد نمی‌کند. در پژوهش دیگری [۱۶] تأثیر افزایش اکسیژن بر روی احتراق گازهای اسیدی در شعله هیدروژن/هوا در شرایط فرآیند کلاوس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مشخص کرد که با افزایش میزان O<sub>2</sub> در هوا، تولید SO<sub>2</sub> افزایش می‌یابد و لذا H<sub>2</sub>S تمایل کمتری برای تبدیل شدن به S<sub>2</sub> پیدا می‌کند. همچنین به علت واکنش‌های CO در فرآیند، با افزایش میزان اکسیژن، مقدار COS افزایش می‌یابد، ولی از میزان CS<sub>2</sub> کاسته می‌شود. همچنین سلیم و همکاران [۱۷] فرآیند احتراق در شعله هیدروژن/هوا را با نسبت‌های مختلف گاز اسیدی (H<sub>2</sub>S و CO<sub>2</sub>) مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که در این فرآیند، CO<sub>2</sub> در اکسایش شرکت کرده و سبب تولید ترکیباتی که از کربن و سولفور (مانند: COS و CS<sub>2</sub>) تشکیل شده است، می‌شود. تشکیل این ترکیبات بازده فرآیند کلاوس را پایین می‌آورد.

برای پیش‌گرم کردن هوای ورودی فرآیند، لی و جو [۱۸ و ۱۹] از جریان خروجی از دودکش استفاده کردند. این امر موجب افزایش راندمان حرارتی کوره گردید و میزان خروج دی‌اکسیدکربن را کاهش داد. بهادری و ونهالورو [۲۰] و دانون و همکاران [۲۱] نشان دادند که با کم کردن درصد هوای اضافی در کوره می‌توان مقدار هوای قابل احتراق را کاهش داد که این امر موجب بهبود عملکرد حرارتی کوره و کاهش اکسیدهای نیتروژن می‌گردد. لی و چیجو [۲۲] نشان دادند که با جایگزینی جریان سوخت پر هیدروژن به جای گاز طبیعی، تنظیم اکسیژن خروجی از دودکش، پیش‌گرم کردن هوای ورودی و بهینه کردن زاویه

<sup>6</sup> Damper

سوخت فراهم گردد. برای رسیدن به این هدف، پارامترهایی همچون نسبت سوخت به هوا در مجرای اصلی ورود هوا، میزان و نقش هوای اضافی ورودی در پایین دودکش، تعبیه مجرای اضافی ورود هوا در انتهای کوره برای اختلاط بیشتر اکسیژن و  $H_2S$ ، تزریق هوا به مجرای ورودی گازهای اسیدی و امکان سنجی پیش گرم کردن هوای ورودی و تأثیر آن بر روی بازدهی احتراق، مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- کوره زباله‌سوز پالایشگاه فجر جم

تعداد کوره‌های زباله‌سوز که در غرب پالایشگاه مرکزی فجر جم قرار گرفته، ۴ عدد می‌باشد. نقش این کوره‌ها در پالایشگاه سوزاندن گازهای اسیدی (جریان گاز اسیدی) که عمدتاً شامل  $H_2S$  می‌باشد، است. علاوه بر این، مقداری گاز زائد (جریان گاز شعله) نیز جهت سوختن از واحد شماره ۹۸۰۰ به این کوره‌ها ارسال می‌شود. علاوه بر گازهای ذکر شده، دی سولفیدهایی که در واحد بازیابی مراکس، در فرآیند بازیافت سود سوزآور حاصل می‌شوند نیز برای سوختن به این کوره‌ها منتقل می‌شوند. هر زباله‌سوز از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول، بدنه کوره است که احتراق در آن صورت می‌گیرد. قسمت دوم، دودکش می‌باشد که بین دو کوره مشترک است و گازهای محصول احتراق را به هوا ارسال می‌نماید. قسمت سوم، بخش ورودی کوره است که اتصالات ورودی سیالات و ۸ مشعل در آن قرار گرفته است. تصاویر بخش‌های این زباله‌سوزها در شکل (۱) نشان داده شده است.

هر کوره از یک بدنه استوانه‌ای شکل که به صورت افقی نصب شده، تشکیل شده است. قطر این قسمت برابر  $3/7$  متر و طول آن  $7/8$  متر است. دیواره داخلی کوره به وسیله یک لایه عایق به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر پوشانده شده است. کوره از یک سمت متصل به قسمت تجهیزات ورودی و از سمت دیگر به دودکش متصل شده است. از مهم‌ترین اتصالاتی که روی بدنه کوره قرار گرفته، می‌توان به محل ورودی گازهای اسیدی اشاره کرد که قطر آن  $0/4$  متر و با زاویه تقریبی ۷۵ درجه نسبت به افق نصب شده است.

در این واحد، هر دو عدد کوره زباله‌سوز، به‌طور مشترک به یک دودکش وصل شده است. جهت پخش مناسب گازهای حاصل از احتراق که عمدتاً شامل  $SO_2$ ،  $CO_2$ ، بخار آب و اکسیدهای ازت می‌باشد، ارتفاع دودکش زیاد در نظر گرفته شده است. ارتفاع تقریبی دودکش ۶۰ متر و قطر آن در

کوره‌های گرمایش پالایشگاه‌ها از جمله تجهیزات با میزان مصرف انرژی و انتشار کربن بالایی است و لذا بازیابی حرارت اتلافی گازهای دودکش و حذف آلاینده‌های آن می‌تواند تأثیر قابل توجهی در صرفه‌جویی انرژی و بهبود سازگاری زیست محیطی آن‌ها داشته باشد. در این راستا، مو و همکاران [۲۷] به بررسی اثرات بازیابی حرارت اتلافی از گاز دودکش با استفاده از افزودن یک مبدل حرارتی متراکم گاز دودکش<sup>۷</sup> (FGCHE) در کوره گرمایش پرداختند. اثرات دما و افت فشار گاز دودکش بر صرفه‌جویی انرژی و کاهش میزان انتشار کربن در شرایط دمای هوای احتراق، رطوبت و ضریب هوای اضافی پس از احتراق کامل گاز سوختی به دست می‌آمد. نتایج نشان داد، زمانی که دمای گاز دودکش از ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به ۲۰ الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد، راندمان استفاده از گرمای اتلافی گازهای دودکش به  $98/1-74/4$  درصد می‌رسد.

بر طبق مطالب بیان شده مشخص است که مطالعات زیادی برای بهبود عملکرد کوره‌های صنعتی انجام شده است. از آنجایی که مطالعات بر روی زباله‌سوزها بیشتر معطوف به زباله‌سوزهای شهری است [۲۸-۳۱]. اما در زمینه زباله‌سوزهای پالایشگاهی به دلیل شرایط عملیاتی، صرف زمان و هزینه بالا و ... مطالعات محدود است. با توجه به اینکه زباله‌سوز به عنوان آخرین مرحله فرآیند و به عنوان یک پل بین زباله‌های پالایشگاه و محیط‌زیست مطرح می‌شود، می‌بایست شرایط مطلوب برای از بین بردن آلاینده‌های مورد نظر در واحد را داشته باشد.

لذا هدف از انجام این پژوهش بهبود عملکرد زباله‌سوز پالایشگاه فجر جم به عنوان نمونه مورد مطالعه است. هدف اصلی در زباله‌سوز پالایشگاه فجر جم، از بین بردن  $H_2S$  موجود در جریان گازهای اسیدی ورودی به کوره است. ترکیبات اسیدی نظیر  $H_2S$  جزء جدایی‌ناپذیر گازهای استحصالی از چاه و مخازن گازی هستند که در فرآیند شیرین‌سازی گاز از آن جدا می‌شوند و در کوره‌های زباله‌سوز تغییر شکل می‌یابند و به گازهای کم‌خطر و غیرآلاینده تبدیل می‌شوند. بنابراین هرچه میزان  $H_2S$  در خروجی دودکش کوره زباله‌سوز کمتر باشد این واحد وظیفه خود را بهتر انجام داده است. البته باید در نظر داشت، برای داشتن احتراق مناسب در این واحد، باید بیش‌ترین میزان تبدیل  $H_2S$ ، با کمترین تولید  $CO$  و  $NO_x$  و کمترین میزان مصرف

<sup>7</sup> Flue gas condensing heat exchanger

مشخصات خوراک‌های ورودی به پالایشگاه فجر جم در تابستان در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به اینکه در تابستان هفت واحد از هشت واحد شیرین سازی در سرویس می‌باشد، بنابراین دبی گاز هر واحد در حدود ۱۲/۸ میلیون مترمکعب استاندارد در روز است. مشخصات گاز اسیدی تحویلی به واحد بازیافت گوگرد برای ۴ کوره زباله سوز و همچنین مشخصات گاز مشعل و گاز سوخت ورودی به کوره‌ها در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به میزان بالای متان در گاز مشعل، از این جریان بیشتر به عنوان سوخت مشعل استفاده می‌شود.

جدول ۱. مشخصات خوراک ورودی به پالایشگاه

ترکیب (درصد مولی)	نار	کنگان	خوراک اصلی
N <sub>2</sub>	4.64	5.96	5.59
CO <sub>2</sub>	1.57	1.85	1.77
C <sub>1</sub>	87.77	85.11	85.848
C <sub>2</sub>	3.63	4.23	4.06
C <sub>3</sub>	1.15	1.36	1.3
iC <sub>4</sub>	0.25	0.3	0.286
nC <sub>4</sub>	0.36	0.44	0.417
iC <sub>5</sub>	0.18	0.21	0.201
nC <sub>5</sub>	0.13	0.15	0.144
nC <sub>6</sub>	0.16	0.18	0.174
C <sub>7</sub> <sup>+</sup>	0.16	0.21	0.196
H <sub>2</sub> S (mg/scm)	55	650	485
دبی (MMSCMD)	25	65	90
دما (°C)	45	48	47.17
فشار (barg)	83	83	83

جدول ۲. مشخصات گاز اسیدی، گاز مشعل و گاز سوخت

ترکیب (درصد مولی)	گاز اسیدی	گاز مشعل	گاز سوخت
O <sub>2</sub>	-	-	-
N <sub>2</sub>	-	3.35	1.33
CO <sub>2</sub>	89.38	3.07	0.79
H <sub>2</sub> S	1.87	0.0918	0.389
C <sub>1</sub>	-	86.42	65.91
C <sub>2</sub>	-	3.06	10.827
C <sub>3</sub>	-	0.669	10.687
iC <sub>4</sub>	-	0.01	3.527
nC <sub>4</sub>	-	0.014	6.54
iC <sub>5</sub>	-	0.0084	-
nC <sub>5</sub>	-	0.0058	-
nC <sub>6</sub>	-	0.047	-
C <sub>7</sub> <sup>+</sup>	-	0.0073	-
H <sub>2</sub> O	8.42	3.21	-
CH <sub>4</sub> and Others	0.33	-	-
دبی (MMSCMD)	1.646	0.06209	0.011386
دما (°C)	55	61	40
فشار (barg)	0.6	0.8	0.34

پایین ۶/۵ متر و در بالا در حدود ۳/۸ متر است. در قسمت ورودی هر کوره ۸ مشعل تعبیه شده است که به وسیله لوله‌هایی با قطرهای مختلف، گاز فلش، گاز سوخت و جریان H<sub>2</sub>S به ورودی هر مشعل تزریق می‌شود. نقش گاز سوخت در مشعل‌ها ایجاد شعله و حرارت در درون قسمت احتراق کوره می‌باشد. این شعله و حرارت ناشی از آن سبب احتراق مواد ورودی به کوره مانند H<sub>2</sub>S یا دی سولفیدها می‌گردد.



(الف)



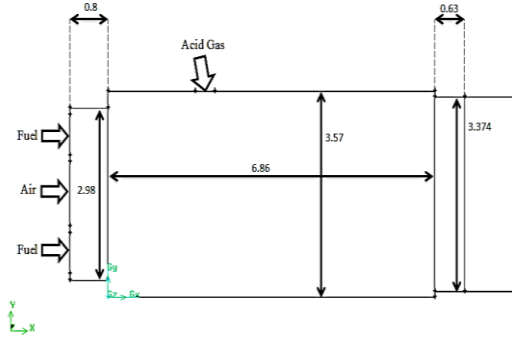
(ب)



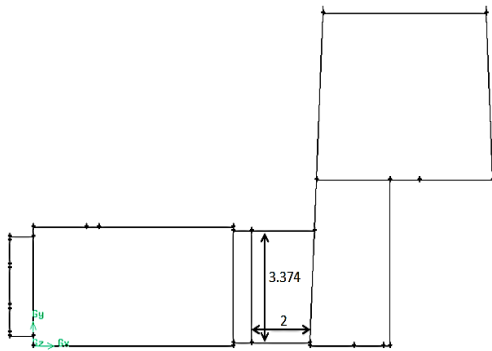
(ج)

شکل ۱. بخش‌های مختلف زباله سوز پالایشگاه فجر جم، (الف) بدنه کوره، (ب) دودکش کوره، (ج) قسمت ورودی کوره

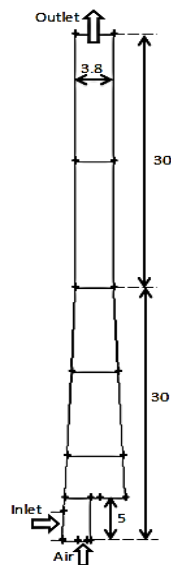
نواحی مختلف با سرعت‌های غیر یکسان با هم مخلوط می‌شوند، لذا این سیستم از نوع احتراق غیر پیش آمیخته است که باید آشفتگی<sup>۹</sup> را هم در مدل‌سازی آن در نظر گرفت [۳۲ و ۳۳].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. (الف) اندازه کوره زباله‌سوز، (ب) اندازه مجرای متصل‌کننده کوره و دودکش، (ج) اندازه دودکش زباله‌سوز مورد مطالعه بر حسب متر

### ۳- روش مدل‌سازی واحد زباله‌سوز

در این پژوهش جهت مدل‌سازی واحد زباله‌سوز به کمک آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۸</sup> (CFD) از نرم‌افزار پیش‌پردازنده Gambit برای تولید شبکه و از نرم‌افزار Fluent 6.3 برای حل معادلات مدل استفاده شده است.

#### ۳-۱- هندسه زباله‌سوز

با توجه به تقارن کوره‌ها در پالایشگاه فجر جم، تنها یکی از آن‌ها شبیه‌سازی شده است. هندسه کلی واحد مورد مطالعه از سه قسمت کوره، دودکش و مجرای اتصال بین آن‌ها تشکیل شده است. هندسه کوره و ابعاد آن در شکل (۲-الف) نشان داده شده است.

قطر مجرای ورودی هوا، ۱/۱۲ متر و مجراهای ورودی سوخت مشابه هم هستند و قطر هر کدام از آن‌ها ۰/۷ متر است. جریان سوخت از ترکیب شدن سه جریان گاز فلش، گاز سوخت و سولفید هیدروژن تشکیل می‌شود. گاز اسیدی در مجرای به قطر ۰/۴ متر و با زاویه ۲۸۵ درجه وارد اتاقک احتراق می‌شود. ضخامت لایه عایق در این قسمت ۱۵ سانتیمتر است.

مجرای متصل‌کننده کوره و دودکش در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. وظیفه این مجرا اتصال دودکش و کوره است. هندسه دودکش در شکل (۲-ج) آورده شده است. قطر پایین دودکش ۶/۵ متر است. قطر مجرای ورودی هوا یک متر در نظر گرفته شده است. در واقعیت دقیقاً در این ناحیه ورود هوا وجود ندارد ولی به علت اینکه در مدل‌سازی دوبعدی ورود هوا در پایین برج در نظر گرفته شود، این ورودی به هندسه اضافه شده است. قطر دودکش تا ارتفاع ۳۰ متری متغیر است و سپس تا ارتفاع ۶۰ متری ثابت می‌ماند. ارتفاع دیواره بین دو کوره ۵ متر و عرض آن یک متر در نظر گرفته شده است. ضخامت لایه عایق در این قسمت ۷/۵ سانتیمتر است.

#### ۳-۲- شرایط و معادلات حاکم بر مسئله

برای شبیه‌سازی مناسب احتراق در کوره زباله‌سوز باید علاوه بر فرض‌های قابل قبول، درک درستی از نوع فرآیندهایی که در کوره رخ می‌دهد وجود داشته باشد.

با توجه به اینکه در این سیستم سوخت و هوا در خود محفظه احتراق مخلوط می‌شوند و هیچ پیش اختلاطی بین هوا و جریان سوخت رخ نمی‌دهد و جریان‌های متفاوت از

<sup>۹</sup> Turbulency

<sup>۸</sup> Computational Fluid Dynamic (CFD)

کسر مخلوط بر مبنای دانسیته متوسط به صورت رابطه (۴) است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) \quad (4)$$

$$= \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m$$

$$+ S_{user}$$

$S_m$  مربوط به نفوذ جرم از قطره های مایع یا اجزای واکنش دهنده به داخل فاز گاز است و  $S_{user}$  نشان دهنده هر ترم مبنایی است که کاربر تعریف می کند.

علاوه بر حل رابطه (۴)، یک معادله بقا هم برای واریانس کسر مخلوط ( $\bar{f}^2$ ) باید حل شود [۳۵] که این معادله به شکل زیر بیان می گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}^2) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}^2) \quad (5)$$

$$= \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f}^2 \right)$$

$$+ C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2$$

$$- C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \bar{f}^2 + S_{user}$$

در رابطه (۵) در حالت نرمال مقدار ثابت  $\sigma_t$ ،  $C_g$  و  $C_d$  به ترتیب ۰/۸۵، ۲/۸۶ و ۲ است [۳۳]. از واریانس کسر مخلوط برای بهینه کردن مدل تعامل سینتیک واکنش - آشفستگی استفاده می شود.

در یک سیستم احتراقی که  $F$  جریان سوخت،  $O$  جریان اکسیژن و  $P$  جریان محصول ها را نشان می دهد، در شرایط استوکیومتری و با در نظر گرفتن نسبت جرمی جریان هوا به سوخت ( $\Gamma$ ) و نرخ تعادل ( $\varphi$ ) رابطه زیر برقرار است.

$$\varphi F + rO \rightarrow (\varphi + r)P \quad (6)$$

که در آن  $\varphi$  به صورت رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\varphi = \frac{(fuel/air)_{actual}}{(fuel/air)_{stoichiometric}} \quad (7)$$

در این صورت کسر مخلوط برای کل سیستم، به صورت رابطه (۸) است.

$$f = \frac{\varphi}{\varphi + r} \quad (8)$$

با استفاده از معادله (۸) می توان کسر مخلوط را در شرایط استوکیومتری ( $\varphi = 1$ )، شرایط پرسوخت ( $\varphi > 1$ ) و شرایط کم سوخت ( $\varphi < 1$ ) محاسبه کرد [۳۴].

در مدل احتراق غیر پیش آمیخته<sup>۱۰</sup>، سوخت و اکسیژن در جریان های مجزا، وارد محدوده واکنش می شود. تحت فرض های خاصی، خواص ترموشیمیایی<sup>۱۱</sup> می تواند در پارامتر کسر مخلوط<sup>۱۲</sup> ( $f$ ) خلاصه شود که به صورت کسر جرمی زیر بیان می گردد:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (1)$$

در اینجا  $Z_i$  نشان دهنده کسر جرمی جزئی برای جزء  $i$  است. زیرنویس  $ox$ ، جریان اکسیدکننده و زیرنویس  $fuel$  جریان سوخت ورودی را نشان می دهد. اگر ضرایب نفوذ برای همه اجزا یکسان باشد، رابطه (۱) برای همه اجزا مقداری یکسان دارد و کسر مخلوط برابر یک می شود؛ بنابراین کسر مخلوط همان کسر جرمی همان کسر جرمی محلی اجزای قابل اشتعال و غیر قابل اشتعال ( $H$ ،  $C$  و غیره) جریان سوخت، در تمام ترکیب هایی مانند  $CO_2$ ،  $H_2O$  و  $O_2$  و غیره است. با تعریف این کمیت، احتراق به یک مسئله اختلاط ساده تبدیل می شود و دیگر مشکل های ناشی از نرخ های واکنش غیرخطی<sup>۱۳</sup>، رخ نمی دهد.

اگر در سیستم، جریان ثانویه (سوخت، اکسیدکننده و یا جریانی که واکنش نمی دهد) وجود داشته باشد، کسر مخلوط سوخت یا جریان ثانویه، به ترتیب نشان دهنده کسر جرمی جزئی سوخت یا جریان ثانویه است. مجموع همه کسرهای مخلوط در یک سیستم (سوخت، جریان ثانویه و یا اکسیدکننده)، همیشه برابر یک است.

$$f_{fuel} + f_{sec} + f_{ox} = 1 \quad (2)$$

در این رابطه زیرنویس  $sec$  به جریان ثانویه اشاره دارد. همچنین رابطه بین کسر مخلوط ثانویه ( $f_{sec}$ ) با کسر مخلوط ثانویه نرمال شده ( $P_{sec}$ ) به صورت رابطه زیر بیان می گردد.

$$f_{sec} = P_{sec} \times (1 - f_{fuel}) \quad (3)$$

باید توجه داشت که برخلاف  $f_{sec}$ ، مقادیر  $f_{fuel}$  و  $P_{sec}$  بین صفر و یک تغییر می کند [۳۴].

با فرض کردن نفوذ یکسان، معادله های اجزا را می توان به یک معادله برای کسر مخلوط کاهش داد. با وجود اینکه فرض نفوذ یکسان می تواند برای جریان آرام مشکل ساز باشد، این فرض می تواند برای جریان آشفته و هنگامی که نفوذ توده بر نفوذ مولکولی غلبه می کند، درست باشد. معادله

<sup>12</sup> Mixture Fraction

<sup>13</sup> Non-linear mean reaction rates

<sup>10</sup> Non-Premixed Combustion model

<sup>11</sup> Thermo chemistry



که در آن،  $x, y, z$  به ترتیب به مختصات  $x, y, z$  دلالت می‌کند،  $g$  دلالت بر نیروی گرانش در راستای  $x, y, z$ ،  $\bar{\Psi}$  دلالت بر بردار  $n$  بعدی اسکالرهای می‌کند،  $v_i$  مؤلفه‌های بردار سرعت  $\vec{v}$ ،  $S_\beta$  جمله‌های چشمه برای اسکالرهای (مانند جمله‌های چشمه شیمیایی)،  $\tau_{ij}$  مؤلفه‌های تانسور تنش و  $J_i^\alpha$  مؤلفه‌های شار مولکولی (مانند پخش یا رسانش گرما) اسکالر  $a$  در جهت  $i$  می‌باشد. جمله‌های  $\langle \vec{v} \cdot \bar{\Psi} | q \rangle$ ، دلالت بر انتظارهای شرطی متغیر  $q$  دارد، در نتیجه نشان‌دهنده متوسط  $q$  می‌باشد به شرط اینکه ترکیب و سرعت به ترتیب دارای مقادیر،  $\vec{v} \cdot \bar{\Psi}$  باشد. در جمله‌های فیزیکی، این انتظارهای شرطی، متوسط‌های شارهای مولکولی را برای مقادیر معلوم سرعت و اسکالرهای تعیین می‌کند.

برای حل رابطه (۱۱) از روش مونت کارلو استفاده شده که توانایی حل معادله تکامل تابع چگالی احتمال با ابعاد بالا را دارد. ارتباط تابع چگالی احتمال برای اسکالرهای سرعت  $P(\vec{v}, T, w_i, \rho)$  به یک تابع چگالی احتمال برای اسکالرهای کاهش پیدا می‌کند تا واکنش شیمیایی را به‌طور واقعی تحلیل نماید و میدان سرعت به‌وسیله مدل آشفتهگی  $\epsilon - k$  استاندارد بر پایه معادله‌های ناویر استوکس متوسط‌گیری شده (مدل جریان آشفته)، محاسبه می‌شود. دو مدل از طریق چگالی جرم  $(\rho)$ ، مرتبط می‌شود. مدل تابع چگالی احتمال، یک میدان چگالی جرم فراهم می‌کند که وارد مدل جریان می‌شود. سپس میدان جریان جدید محاسبه شده و اطلاعات به نرم‌افزار برگشت داده می‌شود. این رویه تکرار می‌شود تا حل همگرا گردد [۳۶]. این روش مدل‌سازی (پیوند تابع چگالی احتمال و جریان آشفته) تشریحی واقعی از شعله‌های آشفته ارائه می‌دهد.

بسیاری از سیستم‌های واکنشی شامل انتقال حرارت از دیواره‌ها، از فازی به فاز دیگر و یا شامل جریان‌های مختلف ورودی با دماهای متفاوت می‌شوند. در این‌گونه سیستم‌های غیرآدیباتیک، خواص محلی ترموشیمیایی تنها وابسته به میزان  $f$  نیست، بلکه به میزان آنتالپی ( $H$ ) همبستگی دارد و آنتالپی سیستم، تعادل شیمیایی، دما و اجزای موجود در جریان واکنش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه، تغییرهای آنتالپی ناشی از انتقال حرارت را باید هنگام محاسبه اسکالرهای کسر مخلوط، در نظر گرفت. در این‌گونه سیستم‌های غیرآدیباتیک باید نوسان‌های تلاطم را برای

اگر  $\varphi_i$  نمادی از مقادیر آنی دما، کسر اجزا و یا دانسیته باشد برای یک سیستمی با یک کسر مخلوط و غیرآدیباتیک و با در نظر گرفتن گرمازا یا گرماده بودن سیستم و در صورت وجود جریان ثانویه رابطه زیر برقرار است.

$$\varphi_i = \varphi_i(f_{fuel} \cdot P_{sec} \cdot H) \quad (9)$$

که در آن  $H$  نمایانگر آنتالپی آنی است. در بسیاری از سیستم‌های واکنشی، احتراق با تعادل شیمیایی همراه نیست. آشفتهگی جریانی که نرم‌افزار مدل می‌کند، با مقادیر متوسط این کمیت‌ها در رابطه (۹) در ارتباط است. نحوه ارتباط مقادیر متوسط و مقادیر لحظه‌ای، بسته به مدل سینتیک شیمیایی- آشفتهگی دارد. لذا برای مدل کردن جریان‌های آشفته با سینتیک شیمیایی در احتراق غیر پیش‌آمیخته از مدل تابع چگالی احتمال (PDF<sup>۱۴</sup>) استفاده می‌شود [۳۳].

تابع چگالی احتمال به‌صورت  $p(f)$  نشان داده شده و بیانگر کسری از زمان است که سیال در حالت  $f$  سپری می‌کند [۳۴]. شکل ارتباط اسکالر PDF که در رابطه (۱۰) آورده شده است، نتیجه‌ای از آمیختگی سیال و واکنش است که از معادلات ناویر استوکس حاصل می‌گردد.

$$P(v_x, v_y, v_z, \Psi_1, \dots, \Psi_n; x, y, z, t) \quad (10) \\ = dv_x dv_y dv_z d\Psi_1 \dots d\Psi_n$$

دلالت بر احتمال در زمان  $t$  در یک نقطه فضایی  $x, y, z$  کند که سیال دارای مؤلفه‌های سرعت در گستره بین  $v_i$  و  $v_i + dv_i$  و مقادیر اسکالرهای در گستره بین  $\Psi_\alpha$  و  $\Psi_\alpha + d\Psi_\alpha$  باشد. در این صورت معادله پایستگی، که تکامل PDF را بیان می‌کند، به صورت رابطه (۱۱) است.

$$\rho(\bar{\Psi}) \frac{\partial P}{\partial t} + \rho(\bar{\Psi}) \sum_{j=1}^3 (v_j \frac{\partial P}{\partial x_j}) \quad (11) \\ + \sum_{j=1}^3 \left( [\rho(\bar{\Psi}) g_j - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j}] \frac{\partial P}{\partial v_j} \right) \\ + \sum_{\beta=1}^n \left( \frac{\partial}{\partial \Psi_\beta} [\rho(\bar{\Psi}) S_\beta(\bar{\Psi}) P] \right) \\ = \sum_{j=1}^3 \left( \frac{\partial}{\partial v_j} \left[ \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \right) \vec{v} \cdot \bar{\Psi} \right] P \right) \\ + \sum_{\alpha=1}^n \left( \frac{\partial}{\partial \Psi_\alpha} \left[ \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial J_i^\alpha}{\partial x_i} \right) \vec{v} \cdot \bar{\Psi} \right] P \right)$$

<sup>۱۴</sup> Probability Density Function (PDF)

$$C_1 = \max \left[ 0.43 \cdot \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \cdot \eta$$

$$= S \frac{k}{\varepsilon} \cdot S$$

$$= \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

که در آن،  $k$  انرژی جنبشی تلاطم،  $G_k$  نشان دهنده تولید انرژی جنبشی تلاطم ناشی از تغییرهای سرعت متوسط،  $G_b$  نشان دهنده انرژی جنبشی تلاطم ناشی از شناوری،  $Y_M$  نشان دهنده نسبت بسط نوسانها در تلاطم تراکم پذیر به نرخ پراکندگی کلی،  $S_{ij}$  میانگین نرخ تنسور کرنش است و  $C_2$  و  $C_1\alpha$  ثابت هستند.  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  به ترتیب اعداد پراوتل تلاطم برای  $k$  و  $\varepsilon$  هستند و  $S_k$  و  $S_\varepsilon$  نیز توابعی هستند که توسط کاربر تعریف می شود. معادله ویسکوزیته گردابه ای به صورت رابطه زیر بیان می شود.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

$C_\mu$  در مدل واقع گرا مقدار ثابتی ندارد. در استفاده از این مدل، مش بندی تأثیر مهمی دارد. بخصوص در نزدیکی دیواره ها باید تعداد گره های درگیر در مسئله نسبت به سایر نقطه ها بیشتر باشد. معیار مناسب بودن مش بندی برای مدل کردن تلاطم احتراق، استفاده از پارامتر  $Y^+$  (Y plus) دیواره است که باید مقادیر آن بین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد. هر چه این عدد نزدیک به ۳۰ باشد محاسبه های آشفتگی جریان دقیق تر است [۳۳].

به علت وجود جریان های ورودی با دمای متفاوت از مدل غیرآدیاباتیکی برای شبیه سازی کوره استفاده شده که معادله انرژی در این حالت برای احتراق غیر پیش آمیخته و غیرآدیاباتیکی، به صورت رابطه (۱۶) تعریف می شود.

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} H)$$

$$= \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) \quad (16)$$

$$+ S_h$$

که در آن،  $S_h$  نشان دهنده گرمای واکنش های شیمیایی،  $k_t$  ضریب هدایت گرمایی در جریان آشفته و  $H$  نشان دهنده آنتالپی کل است و با فرض اینکه عدد لوئیس برابر یک باشد، به صورت رابطه  $H = \sum_j Y_j H_j$  بیان می گردد که  $Y_j$  نشان دهنده کسر جرمی جزء  $j$  است و  $H_j$  به صورت زیر تعریف می شود.

محاسبه تابع چگالی احتمال  $P(f, H)$  لحاظ کرد. با فرض  $P(f, H) = P(f) \delta(H - \bar{H})$  و در صورت وجود جریان ثانویه، کمیت های متوسط به وسیله رابطه (۱۲) محاسبه می شود [۳۳].

$\bar{\varphi}_i = \int_0^1 \int_0^1 \varphi_i(f_{fuel}, p_{sec}, \bar{H}) p_1(f_{fuel}) p_2(p_{sec}) df_{fuel} dp_{sec}$

تابع چگالی احتمال در نرم افزار Fluent به وسیله دو تابع ریاضی تابع دابل دلتا<sup>۱۵</sup> و تابع بتا<sup>۱۶</sup> تعریف می شود که تابع بتا نسبت به تابع دابل دلتا دارای دقت بیشتری بوده و شکل تولید شده به وسیله این توابع، تنها وابسته به کسر مخلوط متوسط و واریانس آن است و در این پژوهش از این تابع استفاده شده است.

یکی از پرکاربردترین و مناسب ترین مدل ها در مدل سازی آشفته گی جریان در احتراق درون کوره ها و زباله سوزها، استفاده از مدل  $k-\varepsilon$  است [۳۷-۳۹]. این مدل از نوع مدل های دو معادله ای است به طوری که شامل دو معادله انتقال اضافی برای ارائه کردن خواص آشفته گی جریان می شود. لذا از حالت واقع گرای مدل  $k-\varepsilon$  استفاده شده است چون این مدل دارای دقت بالاتری است و از فرمول بندی جدیدی برای محاسبه ویسکوزیته تلاطم استفاده می کند. علاوه بر این، معادله انتقال جدیدی برای نرخ پراکندگی،  $\varepsilon$ ، به کار رفته است. معادله  $k-\varepsilon$  برای مدل واقع گرا به صورت رابطه های (۱۳) و (۱۴) است.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} \quad (13)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$+ G_k + G_b$$

$$- \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon$$

$$- \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

<sup>16</sup>  $\beta$ -Function

<sup>15</sup> Double-Delta Function

است. مقادیر اعداد بدون بعد Pr، Sc و Le از مرتبه یک فرض شدند. در محاسبه ثابت سرعت برای واکنش‌های احتراق  $K = A^* T^n \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)$  در  $n=0$  در نظر گرفته شده است. در این رابطه،  $E$  انرژی فعال‌سازی،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $T$  دمای مطلق و  $A^*$  ضریب آرنیوس هستند. با توجه به اینکه اطلاعات دقیق از طول دیواره داخل کوره و فاصله بین کوره تا دودکش موجود نیست این دو مقدار به‌طور تقریبی، به ترتیب یک متر و دو متر در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی در شرایط پایا انجام شده است.

انتقال حرارت در دیواره کوره و دودکش آدیباتیک فرض شده است. انتقال حرارت در داخل کوره و دودکش به صورت غیرآدیباتیک و با انتقال حرارت فرض شد. برای حل مسئله از معادله‌های ضمنی و بر مبنای فشار<sup>۱۸</sup> استفاده شده است. کسر مخلوط متوسط برای جریان سوخت برابر یک و واریانس آن صفر در نظر گرفته شده و کسر مخلوط متوسط جریان ثانویه (گازهای اسیدی) نیز یک و واریانس آن صفر در نظر گرفته شد. ۲۵ ذره برای مدل‌سازی واکنش‌ها انتخاب شده که شامل متان، اتان، پروپان، ترکیب‌های گوگرددار و ترکیب‌های نیتروژن‌دار می‌شود. فشار عملیاتی کوره یک بار در نظر گرفته شده است. حد بالای اشتعال<sup>۱۹</sup> برای جریان سوخت و جریان گازهای اسیدی به صورت استوکیومتری در نظر گرفته شده و مقادیر هر کدام به ترتیب ۰/۰۶۵ و ۰/۸۸ جایگذاری شده است.

#### ۳-۴- روش حل عددی

در این پژوهش، از روش حجم محدود<sup>۲۰</sup> استفاده شده است. برای افزایش دقت محاسبات از دقت مضاعف<sup>۲۱</sup> و برای حل معادله‌ها و پیش‌بینی فشار، تکانه، تلاطم و انرژی از معادله درجه دو<sup>۲۲</sup>، برای پیش‌بینی رفتار جریان‌های ورودی به کوره از معادله درجه سه<sup>۲۳</sup> و برای جفت‌سازی<sup>۲۴</sup> سرعت و فشار نیز از حالت ساده<sup>۲۵</sup> استفاده شده است.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- آنالیز استقلال شبکه

برای آنالیز استقلال شبکه‌بندی، نتایج مدل‌سازی تغییرات دما در کوره در ۴ شبکه‌بندی با گره‌های مختلف در شکل (۳-الف) الی (۳-د) نشان داده شده است. هدف انجام این

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

که  $H_j^0(T_{ref,j})$  آنتالپی تشکیل جزء  $j$  در دمای مرجع  $T_{ref,j}$  را نشان می‌دهد [۳۳]. به منظور تحلیل نتایج از دمای متوسط جرمی و برای محاسبه سرعت از سرعت متوسط سطحی که به وسیله روابط زیر بیان می‌شوند، استفاده شده است.

$$\bar{T} = \frac{\int T \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot dA}{\int \rho \cdot \bar{v} \cdot dA} \quad (18)$$

$$\bar{v} = \frac{\int v dA}{A} \quad (19)$$

در این معادلات  $A$  مساحت موردنظر است.

#### ۳-۳- فرض‌های مسئله

به‌عنوان تقریب معقولی برای سیستم‌های احتراقی، می‌توان رفتار واکنش‌دهنده‌ها و فرآورده‌های احتراق را به‌صورت گاز ایده‌آل در نظر گرفت. این فرض کمک قابل‌توجهی در محاسبه ضریب هدایت گرمایی، ظرفیت گرمایی ( $C_p$ )، چگالی، ویسکوزیته و ضریب نفوذ جرمی برای مخلوط گازهای شرکت‌کننده در واکنش می‌کند. با توجه به اینکه در کوره زباله‌سوز با احتراق گازها سروکار داریم، جریان سیال به‌صورت تراکم‌پذیر فرض شده است. فرض شده است که در سیستم دوده تشکیل نمی‌شود لذا می‌توان از شار گرمایی تابش شده به‌وسیله گازها و ذرات صرف‌نظر کرد. اثر نیروهای خارجی مثل گرانش ناچیز فرض شده است. به علت اینکه در کوره عملاً جریان مایعات وجود ندارد و دبی جریان سولفیدهای روغنی نسبت به دبی گازهای اسیدی بسیار ناچیز است. برای جلوگیری از دوفازی شدن مسئله و محدودیت مدل احتراق غیر پیش‌آمیخته، این جریان نادیده گرفته شده و بجای آن گاز فلش در مشعل مربوطه در نظر گرفته شده است.

پخش و نفوذ حرارتی<sup>۱۷</sup> با توجه به اینکه این پدیده فقط برای گونه‌های سبک ( $H_2$  و  $H$ ) در دماهای کم مهم است، در نظر گرفته نشده است. همچنین از پخش ناشی از گرادیان فشار اثر دفور (انتقال انرژی به‌وسیله گرادیان غلظت یا پخش گرمایی معکوس) نیز در احتراق صرف‌نظر شده

<sup>22</sup> Second Order Upwind

<sup>23</sup> Third Order MUSCL

<sup>24</sup> Coupling

<sup>25</sup> Simple

<sup>17</sup> Thermal diffusion

<sup>18</sup> Pressure based Method

<sup>19</sup> Rich Flammability Limit

<sup>20</sup> Finite Volume Method

<sup>21</sup> Double Precision

$3H_2S + 1.5O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O + 2H_2S$ $\Delta H = -518 \text{ kJ/mol}$	(۲۰)
$2H_2S + SO_2 \rightarrow 1.5S_2 + H_2O$ $\Delta H = 47 \text{ kJ/mol}$	(۲۱)



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۳. میدان دما در کوره برای شبکه بندی با حدود (الف) ۵۰۰ هزار گر، (ب) ۶۵۰ هزار گر، (ج) ۹۵۰ هزار گر، (د) یک میلیون گر

با افزایش میزان اکسیژن،  $H_2S$  تمایل بیشتری برای تبدیل شدن به  $SO_2$  نشان می دهد و در واکنش دوم (رابطه (۲۰)) شرکت نمی کند و همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده میزان  $SO_2$  افزایش می یابد. در حقیقت افزایش دبی هوا در مجرای مورد نظر، هم باعث تأمین اکسیژن مورد نیاز برای واکنش می شود و هم موجب اختلاط بیشتر جریان سوخت و هوا می گردد.

بخش یکسان شدن تغییرات خروجی (کانتورهای دما) با افزایش تعداد مش است تا خروجی مسئله مستقل از تعداد مش شود. با توجه به مشابه بودن رژیم دمایی و ترکیب های جریان در شبکه بندی با حدود ۹۵۰ هزار گر و یک میلیون گر (طبق جدول ۳)، شبکه بندی با یک میلیون گر برای شبیه سازی انتخاب شده که علاوه بر استقلال شبکه بندی، عدد  $Y^+$  آن نیز ۵۶ است. در این جدول، غلظت مواد بر حسب کیلومول بر مترمکعب آورده شده و  $O$  نشان دهنده خروجی دودکش و  $F$  نشان دهنده خروجی کوره است. در این تعداد گر، با کم کردن میزان جرم خروجی از جرم ورودی مشاهده شد که میزان انباشت جرمی نیز حدود  $10^{-4}$  کیلوگرم شد که نشان دهنده برقراری پایستگی جرمی در سیستم است. بنابراین برای مدل سازی کوره و دودکش متصل به آن، از حدود یک میلیون گر و  $2/2$  میلیون سطح استفاده شده است.

#### ۴-۲- اثر دبی هوای ثانویه بر عملکرد زباله سوز

در این مدل سازی نقش دبی هوای ورودی از پایین دودکش یا هوای ثانویه روی شرایط کوره و دودکش، مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل سازی اول، دبی هوا صفر در نظر گرفته شد تا با تغییرهای بعدی به اهمیت هوای ورودی بیشتر پی برده شود. در مراحل بعدی، دبی هوا به ترتیب ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است (دمای هوای ورودی ۴۰ درجه سانتی گراد و فشار آن یک اتمسفر است). برای هر دبی، مدل سازی به طور جداگانه انجام شده و نتایج حاصل از آن برای ترکیبات مهم تر در جدول ۴ و شکل (۵) آمده است.

نتایج نشان می دهد که افزایش دبی هوا در پایین دودکش اثر بسیار زیادی روی بهتر انجام شدن واکنش ها در دودکش دارد. البته، اگر دبی هوای ورودی اصلی کم باشد، در کوره جریان برگشتی رخ می دهد و افزایش دبی هوای ثانویه سبب تغییر دما و ترکیب جریان برگشتی می شود که این تغییرات را می توان در نتایج ستون های مربوط به کوره که با  $F$  نشان داده شده، مشاهده کرد. به طور کلی می توان بیان کرد که در محدوده دبی مورد بررسی، افزایش میزان اکسیژن ورودی موجب مصرف بیشتر  $H_2S$  و  $CO$  شده و میزان ترکیب های  $NO_x$  را افزایش می دهد؛ که این نتایج منطبق بر پژوهش های انجام شده قبلی است [۱۵ و ۱۶]. این پدیده را می توان با استفاده از واکنش های زیر توجیه کرد. واکنش های اصلی  $H_2S$  به صورت روابط زیر می باشد:

جدول ۳. مقایسه دبی جریان‌ها و ترکیب مواد برای تعداد ۹۵۰ هزار و یک میلیون گره

تعداد گره	$VOL_F (m^3/s)$	$VOL_O (m^3/s)$	$V_F (m/s)$	$V_O (m/s)$	$T_F (K)$	$T_O (K)$
۹۵۰,۰۰۰	۳۵/۸۷۷	۷۵/۵۹۸	۱۴/۶۲۰	۱۹/۹۱۸	۸۲۴/۸۴۶	۹۷۲/۲۱۲
۱,۰۰۰,۰۰۰	۳۵/۹۱۵	۷۵/۹۰۲	۱۵/۰۷۶	۱۹/۹۷۶	۹۱۲/۳۸۹	۹۶۹/۵۸۵
تعداد گره	$H_2SF$	$H_2SO$	$CO_F$	$CO_O$	$SO_{2F}$	$SO_{2O}$
۹۵۰,۰۰۰	۰/۰۰۰۱۹۰۷۸۸	۰/۰۰۰۱۰۰۸	۰/۰۰۰۸۲۵۷	۰/۰۰۰۲۵۲	۰/۰۰۰۰۰۲۱۷	۰/۰۰۰۰۰۲۷۱
۱,۰۰۰,۰۰۰	۰/۰۰۰۱۵۰۶۳۵	۰/۰۰۰۱۰۰۹	۰/۰۰۰۵۶۸۴۵۴	۰/۰۰۰۲۶۰۸۲۱	۰/۰۰۰۰۰۷۷۳	۰/۰۰۰۰۰۲۷۶
تعداد گره	$O_{2F}$	$O_{2O}$	$P_F (Pa_g)$	$P_O (Pa_g)$		
۹۵۰,۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۱۵۰	۰/۰۰۰۰۰۱۱	-۲۴۹/۸۴	-۵۶۸/۱۱۶		
۱,۰۰۰,۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۳۴۵	۰/۰۰۰۰۰۱۱۸	-۲۴۲/۹۴۹	-۵۶۲/۴۲۲		

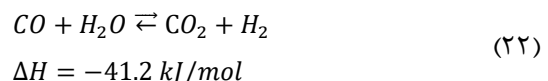
جدول ۴. مقایسه دبی جرمی  $SO_2$  و  $NO_x$  بر حسب کیلوگرم بر ثانیه در خروجی کوره (F) و دودکش (O) با تغییر دبی هوای ثانویه

kg/s(دبی هوا ثانویه)	$(SO_2)_F$	$(SO_2)_O$	$(NO)_F$	$(NO)_O$	$(NO_2)_F$	$(NO_2)_O$	$(NO_x \times 10^3)_O$
صفر	۰/۰۰۷۰۴	۰/۰۰۰۱۴	$۱/۰۶ \times 10^{-۶}$	$۴/۸۱ \times 10^{-۷}$	$۶/۹۶ \times 10^{-۹}$	$۷/۲۲ \times 10^{-۱۰}$	۰/۰۰۰۴۸
۳	۰/۰۲۲۲۴	۰/۰۵۴۴۷	۰/۰۰۲۶۶۴	$۴/۶۷ \times 10^{-۶}$	$-۳/۱۸ \times 10^{-۶}$	$۵/۴۱ \times 10^{-۸}$	۰/۰۰۴۷۳
۶	۰/۰۰۹۳۴	۰/۱۱۹۹۶	$۲/۸۳ \times 10^{-۶}$	$۵/۹۳ \times 10^{-۵}$	$۱/۸۷ \times 10^{-۸}$	$۴/۷۲ \times 10^{-۷}$	۰/۰۵۹۷۶
۹	۰/۰۱۸۹۱	۰/۳۴۹۱۵	$۴/۹۹ \times 10^{-۵}$	۰/۰۰۰۲۸۲۰	$۱/۴۴ \times 10^{-۷}$	$۳/۸۴ \times 10^{-۶}$	۰/۲۸۵۹۱
۱۲	۰/۰۲۱۵۹	۰/۴۳۵۸۳	۰/۰۰۰۱۰۹۹	۰/۰۰۰۴۹۲	$۲/۷۴ \times 10^{-۷}$	$۹/۰۰ \times 10^{-۶}$	۰/۵۰۱۷۲
۱۵	۰/۰۲۴۵۰	۰/۴۵۶۶۰	$۷/۰۲ \times 10^{-۵}$	۰/۰۰۰۶۰۱	$۲/۲۶ \times 10^{-۷}$	$۱/۳۸ \times 10^{-۵}$	۰/۶۱۵۷۵
۱۸	۰/۰۲۵۱۱	۰/۵۱۳۱۰	$۹/۱۱ \times 10^{-۵}$	۰/۰۰۰۶۹۲۱	$۲/۸۲ \times 10^{-۷}$	$۱/۷۹ \times 10^{-۵}$	۰/۷۱۰۰۹

ایجاد شده، به  $CO_2$  و یا طی چند واکنش زنجیره‌ای [۱۶] به  $COS$  تبدیل می‌شود و در نتیجه میزان آن کاهش می‌یابد.

زمانی که دبی هوای ورودی صفر در نظر گرفته شود، در خروجی برج جریان برگشتی رخ می‌دهد. ورود هوای اضافی در پایین برج، علاوه بر اینکه نقش یک نیروی خارجی برای خروج گازهای حاصل از احتراق را دارد، موجب افزایش افت فشار در برج می‌شود که خود عامل حرکت جریان است. اختلاف فشار در برج در دبی صفر برابر ۸۰ پاسکال و در دبی ۱۸ کیلوگرم بر ثانیه برابر ۶۳۰ پاسکال است.

دو واکنش اصلی که علاوه بر واکنش‌های احتراق ناقص ترکیب‌های هیدروکربنی، میزان تولید و مصرف  $CO$  را در احتراق کنترل می‌کند، به صورت روابط (۲۲) و (۲۳) است.



در دودکش، مونوکسیدکربنی که در کوره و در اثر احتراق ناقص و یا برگشت واکنش اول (رابطه (۲۲)) در دمای بالا

$\text{NO}_x$  افزایش پیدا می‌کند. در کوره برخلاف دودکش با دو عامل مهم وجود دارد. عامل اول وجود جریان برگشتی: به دلیل اینکه دبی جرمی گازهای اسیدی ورودی بسیار بیشتر از میزان دبی جرمی جریان‌های هوا و سوخت است، بخشی از جریان گازهای اسیدی به کوره برمی‌گردد. این برگشت جریان، عامل مهمی در ماندگاری بیشتر  $\text{CO}_2$  در کوره و در نتیجه تولید  $\text{CO}$  بیشتر است. با افزایش دبی هوای ورودی جریان‌های ورودی به مرور به جریان برگشتی غلبه می‌کند (درصد هوای اضافی ۷۰ به بالا) و باعث کاهش تولید  $\text{CO}$  می‌شود، ولی ممکن است این افزایش زیاد جریان هوا باعث اتلاف زیاد حرارت و سوخت شود و یا حتی در مواردی باعث خاموشی شعله گردد. عامل دوم میزان  $\text{NO}_x$ : بخش زیادی از میزان  $\text{NO}_x$  را  $\text{NO}$  تشکیل می‌دهد. افزایش هوا و کاهش نسبت سوخت به هوا منجر به ایجاد شرایط مناسب برای تجزیه  $\text{N}_2$  در دمای بالا و تولید بیشتر  $\text{NO}$  می‌شود. با در نظر گرفتن دو عامل گفته شده باید میزان هوای ورودی را تا حدی زیاد کرد که میزان خروجی  $\text{NO}_x$  از استاندارد تعیین‌شده برای آن، ۳۵۰ پی‌ام<sup>۱</sup> بیشتر نشود و شعله‌ای پایدار و مناسب در ورودی کوره ایجاد گردد. البته در برخی مراجع [۳۵] درصد هوای اضافی لازم برای احتراق با گاز طبیعی ۲۵-۲۰ درصد ذکر شده که این درصد هوا می‌تواند ضمن تولید دمای مناسب برای احتراق  $\text{H}_2\text{S}$  از تولید بی‌رویه  $\text{NO}$  هم جلوگیری کند.

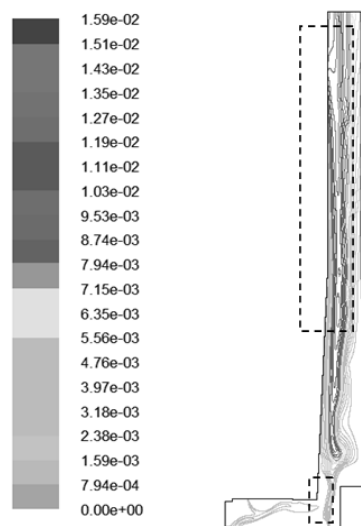
#### ۴-۴- اثر افزایش دمای هوای ورودی از مجرای اصلی ورود هوا

با توجه به اینکه دمای خروجی از کوره و دودکش حدوداً ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است، می‌توان با ایجاد یک تبادل حرارت مناسب بین جریان خروجی از دودکش یا کوره و هوای ورودی، در مصرف سوخت صرفه‌جویی کرد. باید در نظر داشت که جریان سوخت کوره از دو جریان گاز خوراک و گاز مشعل تشکیل شده که با گرمایش هوای ورودی فقط می‌توان مصرف گاز سوخت را کاهش داد زیرا جریان گاز مشعل خود به عنوان زباله به کوره زباله‌سوز وارد می‌شود. میزان تقریبی هوای مورد نیاز با توجه به دبی جریان گاز سوخت و در نظر گرفتن ۲۵ درصد هوای اضافه ۵۶۴۷/۹۵ مترمکعب بر ساعت است. یکی از محدودیت‌های اصلی استفاده از مبدل پیش گرم‌کن برای بازیابی انرژی حرارتی

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، افزایش دبی هوا در دو ناحیه باعث اختلاط مناسب بین هوا و سوخت می‌شود. یکی در قسمت بالای دودکش و نزدیک خروجی و دیگری در ورودی دودکش. وقتی جریان هوای به جریان گازهای ورودی از کوره غلبه می‌کند، این جریان به قسمت بالای دیواره جداکننده نفوذ کرده و باعث می‌شود جریان گاز به سمت دیواره و مسیر خروج  $\text{H}_2\text{S}$  رانده شود که این عمل باعث اختلاط جریان گاز و جریان  $\text{H}_2\text{S}$  خروجی می‌شود. همچنین در ورودی دودکش، اگر جریان هوا به اندازه کافی زیاد باشد، این جریان مانند مانعی جلوی جریان گازهای خروجی از کوره عمل کرده که این امر باعث می‌شود این جریان‌ها زمان ماند و اختلاط بیشتری داشته باشد.

#### ۴-۳- اثر درصد هوای اضافی در مجرای اصلی ورود هوا

برای بررسی این اثر حالت مبنا با درصد هوای اضافی صفر درصد (میزان استوکیومتری هوای لازم برای جریان سوخت و گاز اسیدی) در نظر گرفته شد. هوای اضافی از مجرای اصلی ورودی هوا در درصدهای اضافی ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۵ برای ترکیبات  $\text{SO}_2$  و  $\text{NO}_x$  و برای سایر ترکیبات در شکل (۶) آمده است.



شکل ۴. محل حضور  $\text{SO}_2$  در کوره و دودکش

نتایج نشان داد که افزایش اکسیژن موجب کاهش میزان  $\text{H}_2\text{S}$  و  $\text{CO}$  در خروجی دودکش می‌شود و میزان  $\text{SO}_2$

<sup>۱</sup> ppm (part per million)

خوردگی مبدل، خطوط لوله و دودکش انتهایی تخلیه گازهای خنک شده به محیط، دمای این گازها در خروجی مبدل بهبود دهندند نباید از دمای نقطه شبنم آن‌ها (بین ۱۷۰ تا ۲۱۵ درجه سانتی‌گراد) کمتر شود.

گازهای حاصل از احتراق، وجود حداقل نقطه سرمایش گازهای حاصل از احتراق می‌باشد. با توجه به وجود ترکیب‌های گوگردار در گازهای خروجی کوره و به منظور جلوگیری از میعان و در نتیجه افزایش قابل توجه نرخ

جدول ۵. مقایسه دبی جرمی  $SO_2$  و  $NO_x$  بر حسب کیلوگرم بر ثانیه در خروجی کوره (F) و دودکش (O) با تغییر درصد هوای اضافی در مجرای اصلی ورود هوا

درصد هوای اضافی (%)	$(SO_2)_F$	$(SO_2)_O$	$(NO)_F$	$(NO)_O$	$(NO_2)_F$	$(NO_2)_O$	$(NO_x \times 10^3)_O$
صفر	۰/۰۰۹۳	۰/۱۲۰۰	$۲/۸۳ \times 10^{-۶}$	$۵/۹۳ \times 10^{-۵}$	$۱/۸۷ \times 10^{-۸}$	$۴/۷۲ \times 10^{-۷}$	۰/۰۵۹۷۶
۱۰	۰/۰۱۷۲	۰/۱۸۷۱	$۱/۲۵ \times 10^{-۴}$	$۱/۱۱ \times 10^{-۴}$	$۱/۸۲ \times 10^{-۷}$	$۱/۱۵ \times 10^{-۶}$	۰/۱۱۱۸۱
۳۰	۰/۰۲۳۱	۰/۱۵۱۱	$۱/۴۷ \times 10^{-۴}$	$۲/۱۹ \times 10^{-۴}$	$۳/۳۳ \times 10^{-۷}$	$۹/۶۵ \times 10^{-۷}$	۰/۲۲۰۱۴
۵۰	۰/۰۵۰۳	۰/۲۴۱۶	$۸/۰۳ \times 10^{-۴}$	$۲/۶۸ \times 10^{-۴}$	$۴/۲۷ \times 10^{-۶}$	$۱/۹۶ \times 10^{-۶}$	۰/۲۷۰۳۵
۷۰	۰/۰۵۱۳	۰/۲۲۶۲	$۱/۷۶ \times 10^{-۳}$	$۴/۸۵ \times 10^{-۴}$	$۳/۰۶ \times 10^{-۶}$	$۲/۱۵ \times 10^{-۶}$	۰/۴۸۶۸۷
۹۰	۰/۰۶۹۷	۰/۳۳۳۶	$۲/۳۲ \times 10^{-۳}$	$۵/۰۶ \times 10^{-۴}$	$۷/۴۶ \times 10^{-۷}$	$۳/۸۶ \times 10^{-۶}$	۰/۵۰۹۶۱

جدول ۶. مقایسه دبی جرمی  $SO_2$  و  $NO_x$  بر حسب کیلوگرم بر ثانیه در خروجی کوره (F) و دودکش (O) با تغییر درصد تزریق هوا به جریان گاز اسیدی ورودی به کوره

درصد هوای اضافی (%)	$(SO_2)_F$	$(SO_2)_O$	$(NO)_F$	$(NO)_O$	$(NO_2)_F$	$(NO_2)_O$	$(NO_x \times 10^3)_O$
صفر	۰/۰۳۱۸	۰/۳۳۹۵	$۸/۸۸ \times 10^{-۴}$	$۵/۳۴ \times 10^{-۴}$	$۱/۸۴ \times 10^{-۶}$	$۴/۲۰ \times 10^{-۶}$	۰/۵۲۸۲۸
۱۰	۰/۰۴۹۱	۰/۳۷۰۵	$۴/۵۶ \times 10^{-۴}$	$۵/۱۰ \times 10^{-۴}$	$۱/۴۲ \times 10^{-۷}$	$۴/۱۰ \times 10^{-۶}$	۰/۵۱۳۶۴
۲۰	۰/۰۳۲۸	۰/۳۷۳۶	$۲/۲۸ \times 10^{-۴}$	$۶/۳۱ \times 10^{-۴}$	$۳/۴۶ \times 10^{-۸}$	$۴/۶۳ \times 10^{-۶}$	۰/۶۳۵۷۴
۳۰	۰/۰۳۷۸	۰/۴۰۰۸	$۶/۷۷ \times 10^{-۵}$	$۶/۷۹ \times 10^{-۴}$	$۲/۹۲ \times 10^{-۷}$	$۴/۹۹ \times 10^{-۶}$	۰/۶۸۳۸۹
۴۰	۰/۰۴۴۵	۰/۴۰۹۷	$۱/۰۶ \times 10^{-۳}$	$۸/۰۱ \times 10^{-۴}$	$۱/۴۷ \times 10^{-۶}$	$۶/۰۶ \times 10^{-۶}$	۰/۸۰۷۴۵

کیلوکالری بر متر مکعب است [۳۹]، میزان کاهش مصرف گاز طبیعی در کل کوره‌های مجتمع ۶۳۶،۱۶۹ مترمکعب در سال است که رقم قابل توجهی می‌باشد.

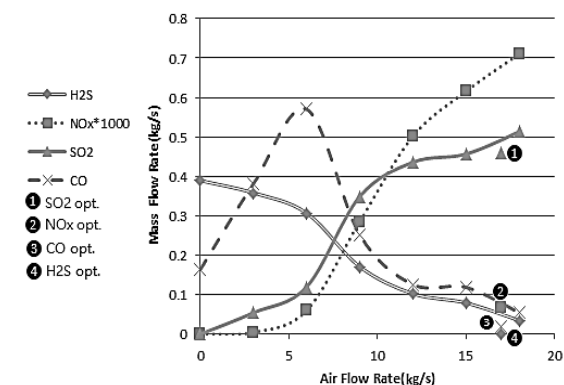
#### ۴-۵- اثر تزریق هوا به جریان گاز اسیدی ورودی به کوره

یکی از عوامل مهم در احتراق بهینه گاز  $H_2S$ ، اختلاط مناسب آن با جریان اکسیژن است. از این رو برای رسیدن به این هدف دو راه وجود دارد: راه اول تزریق هوا به جریان گاز اسیدی و راه دیگر تزریق هوا در مسیر حرکت  $H_2S$  و ایجاد مجرای هوای اضافی در زباله‌سوز است. در این بخش

لذا میزان افزایش دمای هوا به وسیله بازده مبدل و حد نقطه شبنم گازهای اسیدی مشخص می‌گردد. در این بررسی با توجه به اینکه دمای سیستم حدوداً ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد فرض شده است، بیش‌ترین میزان افزایش دمای هوا تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. لذا میزان حرارت داده شده به جریان هوا ۶۲۵۴۹/۴۶ کیلوکالری بر ساعت برآورد گردید. این انرژی به وسیله هوای احتراق پیش‌گرم شده ورودی، به کوره‌های مجتمع وارد شده و لذا معادل با این انرژی، مصرف گاز طبیعی در کوره‌ها کاهش خواهد یافت. نظر به اینکه ارزش حرارتی گاز طبیعی ایران برابر با ۸۶۰۰

نهایی میزان درصد هوای اضافی تزریق‌شده به جریان گازهای اسیدی ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. دبی جرمی هوای ورودی از پایین برج باید بین ۱۵ تا ۲۰ کیلوگرم بر ثانیه باشد. زیرا در دبی‌های جرمی کمتر، اکسیژن مناسب برای کامل شدن واکنش‌های احتراق و اختلاط مناسب در خروجی کوره رخ نمی‌دهد و در دبی‌های زیاد، این جریان به‌عنوان سدی در برابر جریان گازهای خروجی از کوره عمل می‌کند و علاوه بر افزایش زمان ماندگاری باعث تبدیل  $SO_2$  به  $SO_3$  می‌شود که ممکن است باعث افزایش خوردگی شود. در مدل‌سازی نهایی، دبی هوای ورودی از پایین برج ۱۷ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

برای مشاهده بهتر نتایج حاصل از مدل‌سازی نهایی، این نتایج در نمودارهای ۵ تا ۷ با نتایج هر کدام از مدل‌های قبلی مقایسه شده است. نقاط شماره‌دار در نمودار مربوط به نتایج مدل نهایی است.



شکل ۵. مقایسه دبی جرمی آلاینده‌ها در شرایط عملکردی بهبودیافته با مدل‌سازی افزایش دبی هوای ورودی از پایین دودکش

اثر تزریق هوا به جریان گاز اسیدی، قبل از ورود آن به کوره، بررسی شده است.

دبی هوای ورودی به پایین دودکش ۶ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده و هوا در درصد‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ به جریان گاز اسیدی تزریق شده است. صفر درصد نشان‌دهنده هوای استوکیومتری لازم است که به گاز اسیدی تزریق‌شده و میزان آن با توجه به ترکیب و دبی جریان گاز اسیدی محاسبه شده است. نتایج این مدل‌سازی در جدول ۶ و شکل (۷) آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان هوای تزریق‌شده، میزان  $H_2S$  و  $CO$  کاهش پیدا می‌کند و متناسب با آن و طبق دلایل مطرح‌شده در قسمت قبل، میزان  $NO_x$  و  $SO_2$  افزایش پیدا می‌کند. تزریق مستقیم هوا به این جریان علاوه بر ایجاد اختلاط مناسب بین  $H_2S$  و اکسیژن باعث کاهش هزینه نسبت به روش لوله‌کشی و ایجاد مجرای ورودی در کوره و تزریق هوا در مسیر جریان گازهای اسیدی می‌شود. میزان  $NO_x$  نسبت به سایر روش‌ها افزایش چشم‌گیری دارد، زیرا نیتروژن به‌طور مستقیم و از طریق جریان گاز اسیدی به منطقه با دمای زیاد تزریق می‌شود. میزان  $CO$  نسبت به سایر روش‌ها به میزان زیادی کاهش می‌یابد. با افزایش اکسیژن در ناحیه سوختی دما در خروجی دودکش افزایش می‌یابد، در نتیجه در میزان سوخت مصرفی می‌توان صرفه‌جویی کرد. از طرفی افزایش دما در خروجی کوره منجر به افزایش دبی هوای ورودی پایین دودکش می‌شود که به‌طور مکش طبیعی کار می‌کند. همان‌طور که در مدل‌سازی‌های قبلی نشان داده شد این افزایش دبی به کاهش آلاینده‌ها کمک قابل توجهی می‌کند.

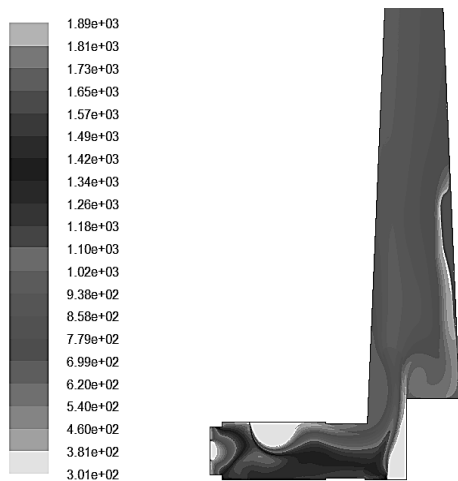
#### ۴-۶- مدل‌سازی زباله‌سوز در شرایط عملکردی بهبودیافته

برای مدل‌سازی نهایی از نتایج مراحل قبلی استفاده شده است. درصد هوای اضافی از مجرای اصلی ورود هوا باید بین ۱۰ تا ۳۰ درصد باشد تا بدون زیاد کردن نرخ تولید اکسیدهای ازت، دمای مناسب برای از بین رفتن  $H_2S$  را فراهم کند. در مدل‌سازی نهایی میزان درصد هوای اضافی ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. درصد هوای اضافی همراه با جریان گاز اسیدی باید کمتر از ۲۰ درصد باشد. زیرا با اینکه  $CO$  به میزان زیادی کاهش می‌یابد ولی تزریق هوا به این جریان نسبت به سایر جریان‌های ورودی، تأثیر بیشتری روی میزان افزایش اکسیدهای ازت دارد. در مدل‌سازی

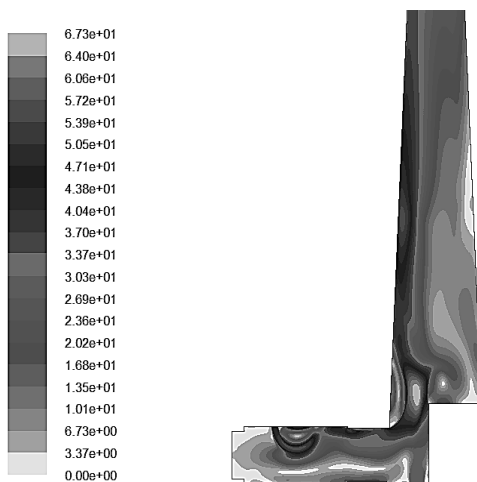


دبی‌های کم هوا، ابتدا اکسیژن باید صرف سوختن متان، اتان و پروپان شود. بنابراین مقدار کمی از هوا صرف سوختن و از بین رفتن  $H_2S$  می‌شود. در مرحله بعد، اکسیژن می‌تواند صرف واکنش با  $H_2S$  شود و میزان آن با شیب سریع‌تری کاهش می‌یابد و در انتها به علت اینکه میزان  $H_2S$  موجود در محدوده واکنش کاهش یافته، میزان شیب مصرف  $H_2S$  کاهش می‌یابد.

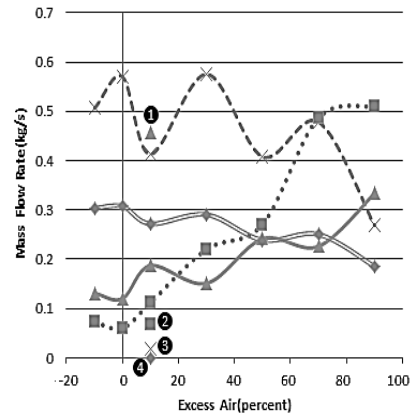
علت وجود بیشینه برای میزان CO در شکل (۵) این است که در دبی‌های کم هوا، میزان CO تولیدشده از احتراق متان، اتان و پروپان در شرایط نبود اکسیژن کافی، افزایش می‌یابد. ولی با افزایش دبی جریان هوا، میزان اکسیژن در دسترس افزایش پیدا می‌کند و کربن مونوکسید با واکنش با اکسیژن به دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شود. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ به ترتیب شکل میدان دما، میدان سرعت و محل حضور  $H_2S$  در کوره آورده شده است.



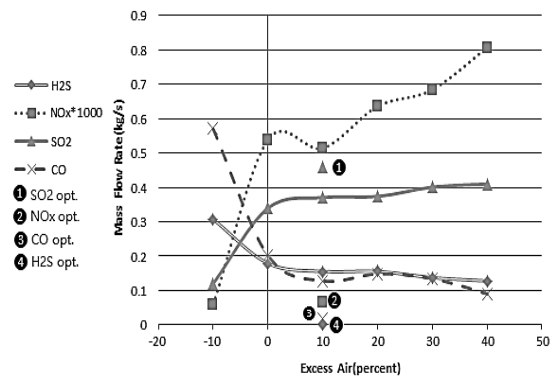
شکل ۸. میدان دما در شرایط عملکردی نهایی



شکل ۹. میدان سرعت در شرایط عملکردی نهایی



شکل ۶. مقایسه دبی جرمی آلاینده‌ها در شرایط عملکردی بهبودیافته با مدل‌سازی افزایش درصد هوای اضافی ورودی از مجرای اصلی ورود هوا

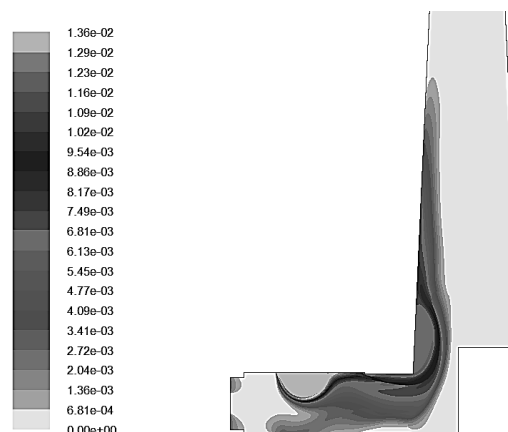


شکل ۷. مقایسه دبی جرمی آلاینده‌ها در شرایط عملکردی بهبودیافته با مدل‌سازی افزایش درصد هوای اضافی در جریان گازهای اسیدی

با توجه به اینکه واکنش اکسایش  $SO_2$  و تبدیل آن به  $SO_3$  یک واکنش گرمازا است. لذا افزایش دما با توجه به اصل لوشاتلیه، باعث کاهش تبدیل  $SO_2$  به  $SO_3$  می‌شود. زمانی که دبی هوای ورودی از پایین دودکش زیاد باشد، این افزایش هوا موجب کاهش دما در دودکش می‌شود و شرایط لازم برای پیشرفت واکنش را فراهم می‌کند.

در مقایسه سه شبیه‌سازی به‌طور مجزا مشخص شد که با توجه به دلایل گفته‌شده، افزایش دبی هوا از پایین دودکش نسبت به افزایش دبی هوا در سایر نقاط ورودی اثر بیشتری روی تولید  $SO_3$  دارد. پس می‌توان گفت که در شرایط عملکردی نهایی میزان تولید  $SO_2$  زیاد شده ولی بخشی از آن به  $SO_3$  تبدیل می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، با افزایش دبی هوا میزان  $H_2S$  ابتدا آهسته کاهش پیدا می‌کند سپس سریع و مجدداً به‌صورت آهسته کاهش می‌یابد. علت این امر این است که در

آمده، مجدداً کوره زباله‌سوز در شرایط عملکردی بهبود یافته مدل گردیده و نتایج آن با هر کدام از سناریوهای در نظر گرفته شده به‌طور مجزا، مورد مقایسه قرار گرفت. با مشخص شدن میزان هوای ورودی مناسب علاوه بر مدیریت سوخت مصرفی می‌توان میزان خروج آلاینده‌های مورد نظر را تا حد زیادی کاهش داد. افزایش میزان هوا در محدوده دبی مورد بررسی، موجب کاهش CO و H<sub>2</sub>S گردیده اما میزان خروج NO<sub>x</sub> را افزایش می‌دهد. همچنین، درصد هوای اضافی بهینه در این ورودی بین ۱۰ الی ۳۰ درصد بدست آمد. نقش هوای ورودی از مجرای ثانویه هوا، تأمین اکسیژن مورد نیاز برای کامل شدن واکنش احتراق و ایجاد اختلاط مناسب بین گازهای خروجی از کوره و هوا است. به‌طور کل می‌توان گفت احتراق مناسب حاصل ایجاد دما، اختلاط و زمان ماند مناسب است. وجود CO بالاتر از حد استاندارد در خروجی دودکش نشان‌دهنده اختلاط نامناسب جریان گازهای موجود در کوره و اکسیژن است. زمانی که میزان NO<sub>x</sub> بالاتر از حد استاندارد باشد میزان CO کاهش می‌یابد که این امر نشان‌دهنده وجود اکسیژن مناسب در محفظه احتراق است.



شکل ۱۰. محل حضور H<sub>2</sub>S در شرایط عملکردی نهایی

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی کوره زباله‌سوز صنعتی در یک پالایشگاه گازی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در نرم افزار Fluent انجام گردید. سپس اثر پارامترهای مختلف عملیاتی نظیر دبی هوای ثانویه، میزان دبی هوا در مجرای اصلی ورود هوا، دمای هوای ورودی و میزان تزریق هوا به جریان گاز اسیدی ورودی بر روی بازده کوره بررسی گردید. با توجه به شرایط عملیاتی به‌دست

## مراجع

- [1] A. K. Kanury. Introduction to combustion phenomena. Gordon & Breach Press, 1975.
- [2] B. Dereli, B. Gürel, G.K. Dolgun and A. Keçebaş. "Comprehensive study on incineration-based disposal of hazardous gas and liquid wastes from used lubricating oil refineries." *Process Safety and Environmental Protection* 184 (2024): 79-95.
- [3] Q. Omrani. Solid waste Incinerators, Material Recycling, and methods of collecting and disposing of toxic and hazardous materials. Vol. 2, The Islamic Azad University, Science and Research Branch Press, 1374. (in Persian)
- [4] S. Consonni, M. Giugliano, and M. Grosso. "Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste: Part A: Mass and energy balances." *Waste Management* 25, no. 2 (2005): 123–135.
- [5] O. Abbasi Sayedabad. "Technical and economic study of different methods for separating sulfur dioxide from exhaust gases from the Claus unit waste incinerator." *Master's thesis*, Ferdowsi University of Mashhad, 1394. (in Persian)
- [6] C.A. Tsiliyannis. "End-of-life flows of multiple cycle consumer products." *Waste Management* 31, no. 11 (2011): 2302–2318.
- [7] M.H. Hadadiyan, H. Arjmandi, O.A. Deme and M.J. Eghbali. "Integrated optimization of geometrical parameters and flow variables for industrial incinerator performance improvement." *Results in Engineering* 20 (2023): p. 101577.

- [8] US Environmental Protection Agency. "Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program." Great Lakes National Program Office, 1994.
- [9] H. Selim, A.K. Gupta, and A. Al-Shoaibi. "Effect of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> concentration in acid gas stream on H<sub>2</sub>S combustion." *Applied Energy* 98 (2012): 53–58.
- [10] V.V. Azatyan, U.M. Gershenson, E.N. Sarkissyan, G.A. Sachyan, and A.B. Nalbandyan. "Investigation of low-pressure flames of a number of compounds containing sulfur by the ESR method." in 12th Symposium (International) on combustion, Vol. 12, no.1, p. 989–994, 1969.
- [11] C.H. Muller III, K. Schofield, M. Steinberg, and H.P. Brodia. "Sulfur chemistry in flames." in 17th Symposium (International) on combustion, Vol. 17, no.1, p. 867–879, Elsevier, 1979.
- [12] M. Frenklach, J.H. Lee, J.N. White, and W.C. Gardner Jr. "Oxidation of hydrogen sulfide." *Combust and Flame* 41 (1981): 1–16.
- [13] J. Bernez-Cambot, C. Vovelle, and R. Delbourgo. "Flame structure of H<sub>2</sub>S–air diffusion flame." in 18th Symposium (International) on combustion, Vol.18, no.1, p. 777–783, 1981.
- [14] H. Selim, A. Al-Shoaibi, and A.K. Gupta. "Effect of H<sub>2</sub>S in methane/air flames on sulfur chemistry and products speciation." *Journal of Applied Energy* 88 (2011): 2593–2600.
- [15] H. Selim, A. Al-Shoaibi, and A.K. Gupta. "Effect of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> concentration in acid gas stream on H<sub>2</sub>S combustion." *Journal of Applied Energy* 98 (2012): 53–58.
- [16] H. Selim, S. Ibrahim, A. Al-Shoaibi, and A.K. Gupta. "Effect of oxygen enrichment on acid gas combustion in hydrogen/air flames under Claus conditions." *Journal of Applied Energy* 109 (2013): 119–124.
- [17] H. Selim, S. Ibrahim, A. Al-Shoaibi, and A.K. Gupta. "Investigation of sulfur chemistry with acid gas addition in hydrogen/air flames." *Journal of Applied Energy* 113 (2014): 1134–1140.
- [18] C.L. Lee, and C.J.G. Joe. "Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace." *Fuel Processing Technology* 92, no.12 (2011): 2335–2340.
- [19] C.L. Lee, and C.J.G. Joe. "Improving furnace and boiler cost effectiveness and CO<sub>2</sub> emission by adjusting excess air." *Environmental Progress and Sustainable Energy* 31, no.1 (2012): 157–162.
- [20] A. Bahadori, and H.B. Vuthaluru. "Estimation of energy conservation benefits in excess air controlled gas-fired systems." *Fuel Processing Technology* 91, no.10 (2010): 1198–1203.
- [21] B. Danon, E.S. Cho, W.D. Jong, and D.J.E.M. Roekaerts. "Parametric optimization study of a multi-burner flameless combustion furnace." *Applied Thermal Engineering*, 31, no.14–15 (2011): 3000–3008.
- [22] L. Chien-Li, and G.J. Chih-Ju. "Integrated methods to improve efficiency of furnace burning recovered tail gas." *International Journal of Hydrogen Energy* 37, no. 8 (2012): 6620–6625.
- [23] G. Liu, Z. Chen, Z. Li, G. Li, and Q. Zong. "Numerical simulations of flow, combustion characteristics, and NO<sub>x</sub> emission for down-fired boiler with different arch-supplied over-fire air ratios." *Applied Thermal Engineering* 75 (2015): 1034–1045.
- [24] E.E. Fordoei, K. Mazaheri, and A. Mohammadpour. "Numerical study on the heat transfer characteristics, flame structure, and pollutants emission in the MILD methane-air, oxygen-enriched and oxy-methane combustion." *Energy* 218 (2021): p.119524.

- [25] I.Ya. Sigal, A.V. Smikhula, O.V. Marasin, M.O. Gurevich, and E.M. Lavrentsov. "Methods to Reduce NOx Formation during Gas Combustion in Boilers." *Energy Technologies and Resource Saving* 4 (2022): 62-72.
- [26] Y. Jiang, B.H. Lee, D.H. Oh, and C.H. Jeon. "Influence of various air-staging on combustion and NOx emission characteristics in a tangentially fired boiler under the 50% load condition." *Energy* 244 Part B (2022): 123167.
- [27] L. Mu, S. Wang, J. Lu, G. Liu, L. Zhao, and Y. Lan. "Effect of flue gas condensing waste heat recovery and its pressure drop on energy saving and carbon reduction for refinery heating furnace." *Energy* 279 (2023): p.128081.
- [28] T. Gu, C. Yin, W. Ma and G. Chen. "Municipal solid waste incineration in a packed bed: A comprehensive modeling study with experimental validation." *Applied Energy* 247 (2019): 127-139.
- [29] C. Mukherjee, J. Denney, E.G. Mbonimpa, J. Slagley and R. Bhowmik. "A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 119 (2020): P. 109512.
- [30] J. Zhuang, J. Tang and L. Aljerf. "Comprehensive review on mechanism analysis and numerical simulation of municipal solid waste incineration process based on mechanical grate." *Fuel* (320), 2022: p.123826.
- [31] I.O. Mikulionok. "Municipal solid waste incineration furnaces (review)." *Energy Technologies and Resource Saving* 74, no. 1 (2023): 59-80.
- [32] J. Warnatz, U. Maas and R.W. Dibble. "Laminar Nonpremixed Flames." *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation* (2006): 129-140.
- [33] Fluent 6.3 User's Guide, 2006.
- [34] Y.R. Sivathanu, and G.M. Faeth. "Generalized State Relationships for Scalar Properties in Non-Premixed Hydrocarbon/Air Flames." *Combustion and Flame* 82 (1990): 211-230.
- [35] W.P. Jones, and J.H. Whitelaw, "Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review." *Combustion and Flame*, Vol. 48, 1982, pp. 1-26.
- [36] M. Nau, A. Wolfert, U. Maas, and J. Warnatz. "Application of combined PDF/finite-volume scheme on turbulent methane diffusion flames." *Transport Phenomena in Combustion*, Taylor & Francis, (1996): 986-994.
- [37] V. Nasserzadeh, J. Swithenbank, D. Scott, and B. Jones. "Design Optimization of a Large Municipal Solid Waste Incinerator." *Waste Management* 11 (1991): 249-261.
- [38] A. Ficarella, and D. Laforgia, "Numerical simulation of flow-field and dioxins chemistry for incineration plants and experimental investigation." *Waste Management* 20 (2000): 27-49.
- [39] W. Yang, H.S. Nam, and S. Choi, "Improvement of operating conditions in waste incinerators using engineering tools." *Waste Management* 27 (2007): 604-613.
- [40] S. Donghoon, C. Kook Ryu and S. Choi. "Computational fluid dynamics evaluation of good combustion performance in waste incinerators". *Journal of the Air and Waste Management Association* 48, no. 4 (1998): 345-351.