



Numerical Simulation of Co-Firing of Biomass-Sulfide Concentrate and Pollutants Formation in the Flash Furnace Copper Smelting

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rajabi N.¹ MSc,

Moghiman M.*¹ PhD

How to cite this article

Rajabi N, Moghiman M., Numerical Simulation of Co-Firing of Biomass-Sulfide Concentrate and Pollutants Formation in the Flash Furnace Copper Smelting. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12): 2927-2934.

ABSTRACT

Co-firing of biomass and fossil fuels in industrial furnaces is a suitable way to reduce the environmental impact from human activities, with acceptable investment. In this paper, the results of numerical simulation co-firing of sulfide concentrates and three auxiliary fuels including gasoil, kerosene and sawdust biomass are compared in the flash furnace copper smelting. For modeling of turbulent flow and combustion, RNG, k- ϵ model and probability density function model (pdf) have been used, respectively. This study has been carried out to investigate the furnace temperature and combustion pollutants distribution. The numerical simulation results show that the flame temperature resulting from the combustion of diesel fuel and sawdust as auxiliary fuel is the highest and lowest, respectively. In biomass combustion, despite that the flame temperature is low, but the NO_x mass fraction increases because there is nitrogen in the sawdust chemical composition. Also in sawdust combustion that the oxygen content is high, the SO₂ and SO₃ sulfur pollutants increase in the high temperatures regions of the furnace and the lower temperature of the auxiliary fuel burner, respectively. Because SO₂ is formed at high temperatures (> 1273K) and oxygen-rich and SO₃ species is produced at relatively low temperatures with excess oxygen. The amount of CO emissions in sawdust combustion is much lower than the amount of combustion of diesel and oil.

Keywords Biomass; Flash Furnace; Co-firing; Pollutants; Combustion

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Phone: -

Fax: -

moghiman@um.ac.ir

Article History

Received: May 1, 2018

Accepted: May 21, 2019

ePublished: December 21, 2019

CITATION LINKS

[1] The effects of biomass co-gasification and co-firing on the development of combustion dynamics [2] Technoeconomic assessment of beetle kill biomass co-firing in existing coal fired power plants in the Western United States [3] Integrated techno-economic and environmental assessments of sixty scenarios for co-firing biomass with coal and natural gas [4] Analysis of thermal resistance evolution of ash deposits during co-firing of coal with biomass and coal mine waste residues [5] Ash transformation by co-firing of coal with high ratios of woody biomass and effect on slagging propensity [6] A modeling approach to co-firing biomass/coal blends in pulverized coal utility boilers: Synergistic effects and emissions profiles [7] Numerical investigation of combustion of biomass, methane, and gasoil fuels and emissions from a furnace chamber [8] A new mathematical model for copper concentrate combustion in flash smelting furnaces [9] Numerical modeling of Jinlong CJD burner copper flash smelting furnace [10] Numerical simulation of the outokumpu flash smelting furnace reaction shaft [11] Combustion in flash smelting furnaces [12] Physico-chemical characterizations of sawdust-derived biochar as potential solid fuels [13] CFD modelling of the flow and reactions in the Olympic Dam flash furnace smelter reaction shaft. Applied Mathematical Modelling [14] ANSYS fluent theory guide [15] A numerical study on thermal dissociation of H₂S [16] Hydrogen and carbon black production from thermal decomposition of sub-quality natural gas [17] Mathematical modeling of sulfide flash smelting process: Part I

شبیه‌سازی عددی احتراق هم‌زمان زیست‌توده-کنسانتره‌های سولفیدی و تولید آلاینده‌ها در کوره فلش ذوب مس

ندا رجبی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محمد مقیمان PhD*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

احتراق هم‌زمان زیست‌توده و سوخت‌های فسیلی در کوره‌های صنعتی روشی مناسب برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از فعالیت بشر، با سرمایه‌گذاری قابل قبول است. در این مقاله نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی احتراق هم‌زمان کنسانتره‌های سولفیدی و ۳ سوخت کمکی شامل گازوئیل، نفت و زیست‌توده خاکاره در کوره فلش ذوب مس با هم مقایسه شده‌اند. برای مدل‌سازی جریان آشفته و فرآیند احتراق به ترتیب از مدل‌های RNG, k-ε و تابع چگالی احتمال (pdf) استفاده شده است. این مطالعه با هدف بررسی توزیع دمای کوره و آلاینده‌های احتراقی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که دمای شعله حاصل از احتراق گازوئیل و خاکاره به عنوان سوخت کمکی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را دارد. وجود نیتروژن در ترکیب شیمیایی خاکاره منجر می‌شود در احتراق زیست‌توده علی‌رغم دمای پایین شعله، کسر جرمی آلاینده NO_x افزایش می‌یابد. همچنین در احتراق خاکاره با وجود اکسیژن زیاد، مقدار تولید آلاینده‌های گوگردی SO_2 در نواحی دما بالای کوره و SO_3 در نواحی دما پایین مشعل سوخت کمکی افزایش می‌یابد. زیرا SO_2 در دماهای نسبتاً بالا ($>1273\text{K}$) و در شرایط غنی از اکسیژن و گونه SO_3 در دماهای نسبتاً پایین با وجود اکسیژن اضافی تشکیل می‌شود. مقدار تولید آلاینده CO در احتراق خاکاره نسبت به مقدار حاصل از احتراق گازوئیل و نفت بسیار ناچیز است.

کلیدواژه‌ها: زیست توده، کوره فلش، احتراق هم‌زمان، آلاینده‌ها، احتراق

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱

*نویسنده مسئول: moghiman@um.ac.ir

۱- مقدمه

توجه روزافزون به استفاده از سوخت‌های پاک و تجدیدپذیر، منجر به افزایش کاربرد زیست‌توده برای تولید انرژی در کوره‌های صنعتی شده است. از جمله منابع زیست‌توده می‌توان به ترکیبات آلی شامل باقی‌مانده‌های کشاورزی، چوب، کاه، خاکاره و غیره اشاره کرد [1]. سوزاندن زیست‌توده تنها یا به صورت احتراق هم‌زمان انجام می‌شود. در احتراق هم‌زمان زیست‌توده به همراه سایر سوخت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. احتراق هم‌زمان زیست‌توده و سوخت‌های فسیلی کوفایرینگ (Co-firing) نام دارد. کوفایرینگ در واقع ترکیب زیست‌توده با سوخت‌هایی مانند زغال‌سنگ و گاز طبیعی و انجام احتراق هم‌زمان است که عموماً از کوره‌های موجود گاز طبیعی و زغال‌سنگ برای انجام آن استفاده می‌شود. بنابراین انجام احتراق هم‌زمان نیاز به تجهیزات اضافی و افزایش هزینه‌ها ندارد [2, 3].

در سال ۲۰۰۹ طی توافق بین‌المللی بیوانرژی بیان شده است که در سطح دنیا ۱۵۰ نیروگاه از احتراق هم‌زمان زغال‌سنگ و زیست‌توده استفاده می‌کنند که بیشتر آن‌ها در شمال اروپا و ایالات متحده واقع شده‌اند. بیش از ۹۰٪ از نیروگاه‌های حرارتی در سطح دنیا از مشعل‌های احتراقی سوخت جامد استفاده می‌کنند. بنابراین جایگزینی سوخت زیست‌توده در این نیروگاه‌ها با توجه به عدم نیاز به تجهیزات اضافی به سادگی انجام خواهد شد [4]. مطالعات زیادی به منظور امکان‌سنجی فنی و اقتصادی احتراق هم‌زمان زیست‌توده

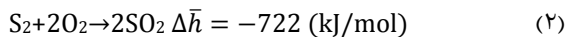
و سوخت‌های فسیلی انجام شده است. مقدار انرژی و آلاینده‌های حاصل از احتراق زیست‌توده به پارامترهای زیادی از جمله ترکیب شیمیایی و عناصر تشکیل‌دهنده زیست‌توده، مقدار خاکستر، چگالی و میزان رطوبت موجود در آن بستگی دارد [1].

پری‌آنتو و همکاران [5] در سال ۲۰۱۶ با مقایسه چهار نوع زیست‌توده چوب در احتراق هم‌زمان با زغال‌سنگ، به بررسی میزان مذاب حاصل در کوره و ترکیبات شیمیایی آن پرداختند. در این آزمایش زغال‌سنگ با بیش از ۷۰٪ زیست‌توده مخلوط شده است. پری‌آنتو و همکاران بیان کردند زمانی که از زیست‌توده با حدود ۰/۴٪ خاکستر استفاده می‌شود میزان مذاب تولیدی و خواص شیمیایی آن در مقایسه با احتراق زغال‌سنگ خالص تغییر چندانی نمی‌کند. اما اگر میزان خاکستر موجود در زیست‌توده به بیش از ۱٪ برسد مقدار زیادی مذاب که سرشار از فلزات قلیایی است تولید می‌شود. افزایش مذاب تولیدی در کوره باعث خوردگی و فرسایش دیواره‌ها می‌شود. پیرز جلدرس و همکاران [6] در سال ۲۰۱۷ به شبیه‌سازی عددی احتراق زغال‌سنگ با جایگزینی حدود ۵٪ سوخت زیست‌توده پرداختند. آن‌ها بیان کردند که با توجه به شروع سریع احتراق زیست‌توده، فرآیند احتراق زغال‌سنگ و عملکرد کوره بهبود یافته است. همچنین با توجه به ترکیبات زیست‌توده میزان انتشار گوگرد دی‌اکسید (SO_2) کاهش پیدا کرده است. شیرنشان و جملوند [7] در سال ۲۰۱۶ شبیه‌سازی عددی احتراق سوخت‌های فسیلی متان (CH_4) و گازوئیل ($\text{C}_{16}\text{H}_{29}$) و همچنین احتراق سوخت‌های زیست‌توده چوب و باقی‌مانده گیاهان را با هدف بررسی انتشار گازهای گلخانه‌ای انجام دادند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، آن‌ها بیان کردند دمای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی بالاتر و میزان تولید کربن دی‌اکسید (CO_2) و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) در احتراق زیست‌توده کمتر از مقدار حاصل از احتراق سوخت فسیلی است. اما SO_2 حاصل از احتراق زیست‌توده مقدار بیشتری دارد. پینا و همکاران [4] در سال ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی احتراق هم‌زمان زغال‌سنگ با بقایای زباله‌های معدنی و جنگلی پرداختند. این مطالعه با هدف ارائه مدلی برای مقایسه میزان انتقال حرارت و مقاومت حرارتی خاکستر باقی‌مانده صورت گرفت. در سال ۲۰۱۷ مطالعه تجربی احتراق هم‌زمان کاه گندم-پروپان و کاه گندم-چوب با هدف جایگزینی کاه گندم به عنوان یک سوخت پاک توسط بارمینا و همکاران [1] انجام شد.

کوره‌های صنعتی ذوب فلش امروزه به عنوان یک روش پیرومتالورژی (Pyro Metallurgical) استخراج مس از ذرات کنسانتره سولفیدی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. کوره‌های ذوب فلش براساس گرمای حاصل از احتراق ذرات کنسانتره سولفیدی فعالیت می‌کنند [8-10] معمولاً مقداری سوخت کمکی مانند گاز طبیعی، زغال‌سنگ و سوخت‌های فسیلی مایع برای تامین گرمای لازم برای شروع واکنش‌ها و حفظ دمای کوره در حالت استراحت استفاده می‌شود [11].

با توجه به توسعه کاربرد سوخت‌های زیست‌توده در کوره‌های صنعتی، در این مقاله شبیه‌سازی عددی احتراق هم‌زمان کنسانتره‌های سولفیدی و زیست‌توده خاکاره انجام شده است. نتایج حاصل از آن با نتایج احتراق هم‌زمان کنسانتره‌های سولفیدی و سوخت‌های فسیلی گازوئیل ($\text{C}_{16}\text{H}_{29}$) و نفت ($\text{C}_{12}\text{H}_{23}$) مقایسه شده‌اند. این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت ۱۴ با هدف بررسی توزیع دما و آلاینده‌های تولیدی در کوره فلش ذوب مس انجام شده است.

واکنش می‌دهد و گرمای زیادی آزاد می‌کند. فرض می‌شود که دمای ذرات تا اتمام واکنش‌های تجزیه ثابت می‌ماند سپس با رسیدن دما به ۸۰۰K سایر واکنش‌های اکسیداسیون اتفاق می‌افتند^[8].



جدول (۲) ترکیب مخلوط کنسانتره تغذیه‌شده به کوره^[8]

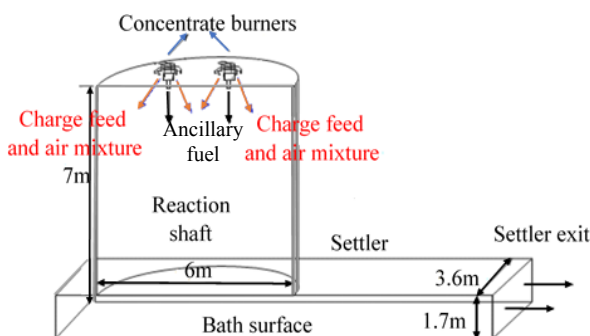
نام ترکیب	نماد	درصد جرمی
کالکوپیریت	CuFeS ₂	۵۰/۳
پیریت	FeS ₂	۲۰
کالکوسیت	Cu ₂ S	۴/۶
سایر	Other	۲۴/۵

جدول (۳) واکنش‌های شیمیایی فرآیند ذوب فلش برای انجام شبیه‌سازی^[8]

واکنش	نوع واکنش
CuFeS ₂ → 0.5Cu ₂ S + FeS + 0.25S ₂	تجزیه (T=۵۰۰K)
FeS ₂ → FeS + 0.5S ₂	
FeS + 1.5O ₂ → FeO + SO ₂	اکسیداسیون (T>۸۰۰K)
Cu ₂ S + O ₂ → 2Cu + SO ₂	

۳- مدل‌سازی ریاضی

کوره مورد مطالعه در این مقاله دارای ظرفیت ۴۶ تن بر ساعت کنسانتره سولفیدی است. میزان سوخت کمکی مورد استفاده ۱۳۱۸kg/h و هوای ورودی ۱۲۳۳۹۲m³/h است. ارتفاع و قطر محفظه واکنش به ترتیب ۷ و ۶ متر است. با توجه به ساختار متقارن محفظه واکنش و ناحیه ستلر فقط نیمی از کوره به عنوان محیط حل در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ هندسه و بخش‌های مختلف کوره نشان داده شده است.



شکل (۱) نمای از هندسه کوره فلش

برای شبکه‌بندی محیط حل در نواحی نزدیک مشعل کنسانتره از شبکه ریزتر و در نواحی پایین محفظه واکنش از شبکه با تراکم کمتری استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از شبکه محاسباتی مورد استفاده در محیط حل نشان داده شده است. محیط محاسباتی از ۸۳۰۱۵ سلول و ۳۶۲۶۹ گره محاسباتی تشکیل شده است. با افزایش تعداد گره‌های محاسباتی نتایج کمتر ۱۰٪ تغییر کرده‌اند.

جریان ورودی هوا، ذرات جامد شارژ و زیست‌توده با استفاده از روش اویلری برای فاز پیوسته جریان و روش لاگرانژی برای ذرات جامد مدل‌سازی شده است. تعاملات جرم و حرارت بین ذرات جامد و فاز گازی از طریق جملات چشمه در معادلات بقای جرم و حرارت گنجانده می‌شوند. برای مدل‌سازی جریان آشفته و احتراق به ترتیب از مدل $k-\epsilon$ و RNG، $k-\epsilon$ (pdf) استفاده شده است. واکنش‌های تجزیه گونه‌های پایدار، تاثیر قابل توجهی بر کاهش دمای شعله و غلظت گونه‌ها دارند. با استفاده از مدل تعادل شیمیایی که توانایی محاسبه تعداد زیادی گونه محصول را دارد تعداد ۵۰ گونه حاصل از این واکنش‌ها محاسبه شده است. اثر انتقال حرارت

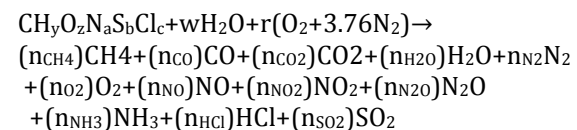
۲- احتراق هم‌زمان ذرات کنسانتره سولفیدی و زیست‌توده

شارژ کوره محتوی ذرات کنسانتره، جریان سیلیسی (کمک ذوب) و غبار بازگردانی همراه با جریان هوای پیش‌گرم‌شده از طریق مشعل‌های کنسانتره واقع در سقف محفظه واکنش به داخل آن تزریق می‌شود. همچنین سوخت زیست‌توده و هوای کمکی از طریق مشعل‌های سوخت کمکی وارد کوره می‌شوند.

احتراق زیست‌توده از نظر فیزیکی و شیمیایی بسیار پیچیده است. زمانی که سوخت و هوا با هم ترکیب می‌شوند و گرمای مورد نیاز برای رسیدن به دمای احتراق مهیا است، احتراق اتفاق می‌افتد. با تکمیل فرآیند احتراق در اثر اکسیداسیون کربن و هیدروژن، گونه‌های CO₂ و H₂O ظاهر می‌شوند و دما به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. از جمله سایر ترکیبات حاصل از احتراق می‌توان به اکسیدهای نیتروژن (NO_x) به طور عمده NO و NO₂، اکسید نیتروس (N₂O)، اکسیدهای گوگرد (SO_x) به طور عمده SO₂، هیدروژن کلرید (HCl)، فلزات سنگین و ذرات جامد اشاره کرد. کسر جرمی گونه‌های حاصل از احتراق به عوامل متعددی مانند اکسیژن کافی، دمای کوره برای شروع احتراق، اختلاط مناسب سوخت و هوا و زمان ماندن ذرات جامد زیست‌توده در کوره بستگی دارد^[7].

در اثر احتراق ناقص زیست‌توده در کوره احتراق ترکیباتی مانند CO، CH₄، ترکیبات آلی فرار، هیدروکربن‌های زنجیره‌ای، آمونیاک (NH₃)، ازن (O₃) و ذرات واکنش‌ناده تشکیل می‌شوند. این ترکیبات بر آب‌وهوا، محیط‌زیست و سلامت انسان تاثیرگذار خواهند بود. واکنش احتراق زیست‌توده طبق رابطه (۱) صورت می‌گیرد^[7].

(۱)



در این رابطه y, z, a, b, c و به ترتیب کسر جرمی هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، گوگرد و کلر به ازای یک اتم کربن در فرمول شیمیایی زیست‌توده است. W مقدار رطوبت موجود در هر کیلومول زیست‌توده را نشان می‌دهد. r مقدار هوای لازم برای احتراق به ازای هر کیلومول زیست‌توده و n تعداد مول گونه‌های حاصل از احتراق برحسب کیلومول است. در جدول ۱ مشخصه‌های اصلی خاک‌اره مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است.

جدول (۱) خواص زیست‌توده خاک‌اره^[12]

ترکیب شیمیایی خاک‌اره (%)				ارزش حرارتی (Mj/kg)
N	O	H	C	۱۸/۳
۳/۱	۳۶/۸	۶/۷	۵۳/۴	

ذرات کنسانتره سولفیدی در داخل کوره فلش، با حرارتی که از طریق انتقال حرارت جابجایی از فاز گاز، انتقال حرارت تابشی از دیواره‌ها و محیط دریافت می‌کنند و همچنین با استفاده از حرارت حاصل از احتراق سوخت کمکی، گرم می‌شوند^[8, 13]. واکنش‌های شیمیایی ذرات کنسانتره طی دو مرحله تجزیه و اکسیداسیون صورت می‌گیرند^[11]. این واکنش‌ها با توجه به ترکیبات ذرات شارژ ورودی به کوره ذوب فلش متنوع‌اند. در جدول ۲ ترکیب ذرات کنسانتره ورودی به کوره ذوب فلش مورد مطالعه نشان داده شده است^[8].

واکنش‌های اصلی کوره ذوب فلش مطابق جدول ۳ انجام می‌شوند. وقتی که دمای ذرات به ۵۰۰K می‌رسد ابتدا واکنش‌های تجزیه ترکیبات سولفیدی رخ می‌دهد. هم‌زمان با واکنش‌های تجزیه، گوگرد آزادشده از تجزیه ترکیبات سولفیدی مطابق رابطه (۲) با اکسیژن

آنتالپی H^* از طریق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

(۶)

$$H^* = \sum_j m_j H_j = \sum_j m_j \left[\int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \right]$$

برای اعمال اثرات آشفته‌گی بر نرخ واکنش‌های شیمیایی از مدل تابع چگالی احتمال استفاده شده است. تابع توزیع چگالی احتمال که با $p(f)$ نشان داده می‌شود، توصیف‌کننده نوسانات لحظه‌ای کمیت f در جریان آشفته است و به عنوان یک تابع وزنی در محاسبات وارد می‌شود. شکل تابع $p(f)$ به طبیعت اغتشاشات متغیر f در جریان آشفته وابسته است. براساس مشاهدات تجربی یک تابع ریاضی برای $p(f)$ در نظر گرفته می‌شود که تقریبی از شکل واقعی آن است [14]. در تحقیق حاضر از تابع توزیع چگالی احتمال β که مقادیر متوسط کسر جرمی گونه‌ها، دما و چگالی مخلوط را به واریانس کسر مخلوط ارتباط می‌دهد استفاده شده است. شکل تابع β که تابعی از f و $\bar{f}^2$ است با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود [15]:

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1} df} \quad (۷-الف)$$

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right] \quad (۷-ب)$$

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

در صورت وجود جریان ثانویه در یک سیستم غیرآدیاباتیکی کمیت‌های اسکالر ϕ (چگالی، دما کسر جرمی متوسط‌گیری شده) طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شوند [14]:

(۸)

در حین حل عددی از مقادیر کسر جرمی گونه‌ها، چگالی و دما برحسب مقادیر مختلف f ، $\bar{f}^2$ و $\bar{H}^*$ که در جداول مشخصی ذخیره شده‌اند استفاده می‌شود. مقادیر این کمیت‌ها در طی حل اصلاح و به‌روزرسانی می‌شوند [15, 16].

سایر معادلات بقا برای فاز گازی در حالت پایا با استفاده از رابطه کلی

(۹) محاسبه می‌شوند $(\phi = 1, u, v, w, k, \varepsilon)$ [8]:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi + S_{p\phi} \quad (۹)$$

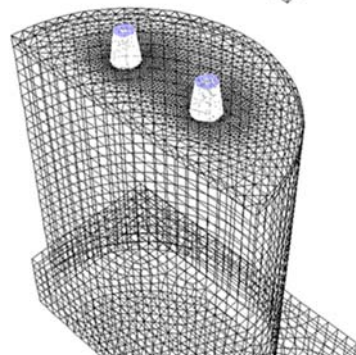
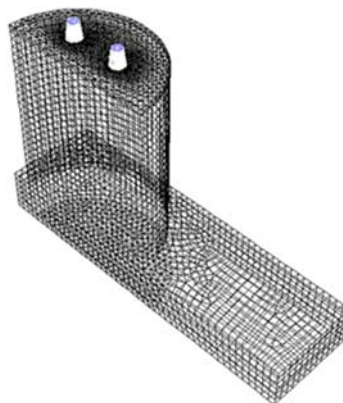
۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی عددی

به منظور بررسی دقت شبکه‌بندی مورد استفاده در مطالعه حاضر، اثر تغییر تعداد شبکه‌بندی محیط حل بر تغییرات دمای کوره فلش مورد بررسی قرار گرفته است. در نمودار ۱ تغییرات دمای کوره برحسب تغییر تعداد گره‌های مورد استفاده در شبکه‌بندی نشان داده شده است. با توجه به نمودار ۱ و در نظر گرفتن زمان محاسباتی مناسب برای حل معادلات، از تعداد ۳۶۲۶۹ گره برای شبکه‌بندی محیط حل استفاده شده است.

در نمودار ۲ توزیع دما و گونه‌های احتراقی CO_2 و NO_x حاصل از شبیه‌سازی عددی احتراق کوره فلش برای دو سوخت کمکی گازوئیل و خاکاره نشان داده شده است. نتایج حاصل بیان‌کننده این است که در احتراق زیست‌توده خاکاره دما در نواحی مشعل سوخت کمکی بسیار کمتر از مقدار آن در احتراق گازوئیل است. زیرا در احتراق خاکاره مقدار زیادی حرارت برای گرم کردن ذرات جامد و تبخیر

تابشی توسط مدل تابشی مختصات گسسته (DOM) مورد بررسی قرار گرفته است. تابش حرارتی با کاهش دمای مناطق داغ‌تر و افزایش دمای مناطق سرد منجر به توزیع یکنواخت دما می‌شود. این پدیده نقش زیادی بر کاهش آلاینده NO_x حرارتی دارد. معادلات بقای جرم، مومنتوم، آنتالپی، انرژی جنبشی آشفته‌گی، نرخ اتلاف آشفته‌گی، کسر مخلوط و واریانس آن برای فاز پیوسته جریان با کاربرد حجم محدود به روش سیمپل (Simple) حل شده‌اند.



شکل (۲) شبکه سه‌بعدی کوره فلش

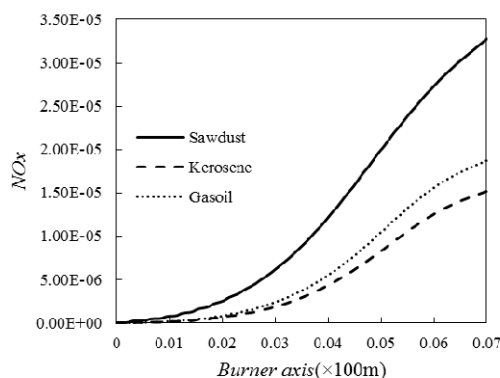
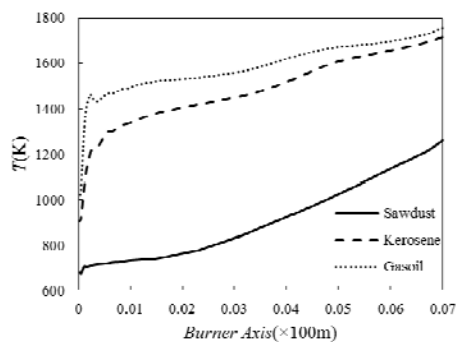
در مدل تعادل شیمیایی با ورود جداگانه سوخت و هوا به محفظه واکنش یک مخلوط تعادلی بین سوخت، اکسیدکننده و محصولات واکنش ایجاد می‌شود. در این مدل با فرض اینکه سرعت واکنش‌ها بسیار بالا است پارامترهای دما، کسرگونه‌ها و چگالی با کمینه کردن انرژی آزاد گیبس مخلوط تعادلی حاصل از سوخت، اکسیدکننده و محصولات واکنش محاسبه می‌گردند. در این روش نیازی به تعیین نرخ یا سرعت واکنش‌ها و همچنین تعداد یا ترتیب واکنش‌ها نمی‌باشد. کمیت‌های دما، فشار و کسر جرمی واکنش‌دهنده‌ها از طریق شرایط مرزی به نرم‌افزار داده می‌شود و نرم‌افزار حالت ترموشیمیایی مخلوط را تعیین می‌نماید و با توجه به حالت ترموشیمیایی، مقدار گونه‌ها، دمای واکنش و چگالی محاسبه می‌گردد. حالت ترموشیمیایی مخلوط حاصل تابعی از کمیتی به نام کسر مخلوط (f) و آنتالپی (در صورت وجود اتلاف حرارتی) است. معادلات بقاء برای ۳ پارامتر کسر مخلوط، واریانس کسر مخلوط ($\bar{f}^2$) و آنتالپی ($\bar{H}^*$) طبق روابط (۳)، (۴) و (۵) حل می‌شوند [14]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \bar{f}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \bar{f}^2) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}^2}{\partial x_i} \right) + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right)^2 \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \bar{H}^*) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_t}{c_p} \frac{\partial \bar{H}^*}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (۵)$$

سوخت دما در طول محور با شیب نسبتاً یکسانی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه گازوئیل ارزش حرارتی بالاتری دارد دمای شعله حاصل از احتراق آن مقدار بیشتری دارد. همچنین مشاهده می‌شود که اختلاف دمای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی گازوئیل و نفت با مقدار حاصل از احتراق خاکاره بسیار زیاد است. زیرا در احتراق خاکاره مقدار زیادی حرارت برای گرم کردن ذرات و تبخیر ترکیبات موجود در آن مصرف می‌شود و ارزش حرارتی آن نسبت به نفت و گازوئیل بسیار کم است. همچنین در نمودار ۳ مشخص است که با وجود اینکه دمای شعله خاکاره کمتر از گازوئیل و نفت است اما مقدار NO_x بیشتری تولید شده است. زیرا در ترکیب شیمیایی خاکاره نیتروژن وجود دارد که با اکسیداسیون آن NO_x تولیدی افزایش می‌یابد.

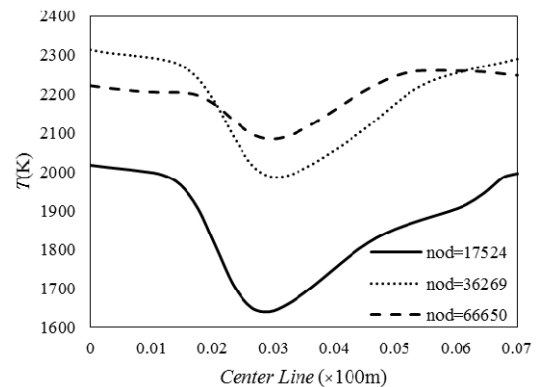


نمودار ۳) مقایسه دما و کسر جرمی NO_x در محور گذرنده از مشعل سوخت کمکی

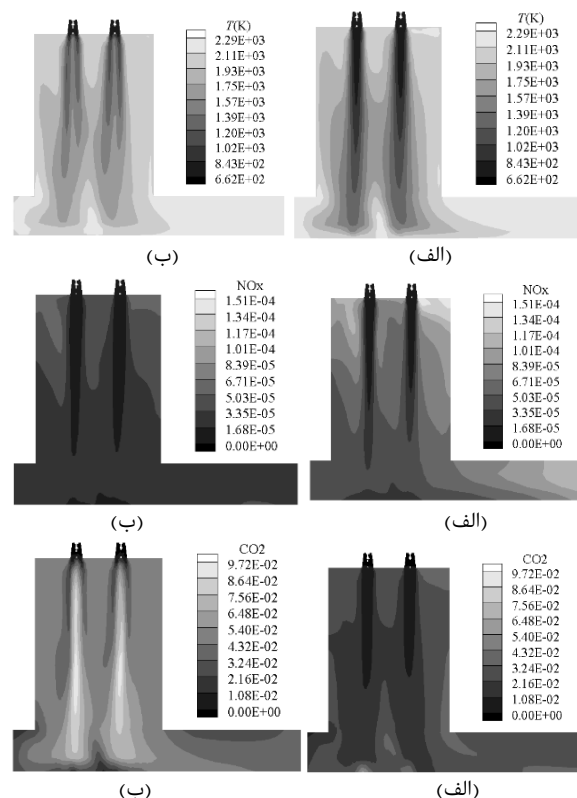
در نمودار ۴ توزیع کسر جرمی آلاینده‌های گوگردی SO_2 و SO_3 و همچنین کسر جرمی O_2 در کوره ذوب فلش برای دو سوخت کمکی گازوئیل و خاکاره نشان داده شده است. با توجه به اینکه در ترکیب سوخت خاکاره اکسیژن وجود دارد، کسر جرمی O_2 در کوره افزایش می‌یابد. این منجر به افزایش مقدار اکسیژن در دسترس برای احتراق گوگرد موجود در ذرات کنسانتره سولفیدی و در نتیجه افزایش جرمی SO_2 در احتراق خاکاره شده است، زیرا SO_2 در شرایط غنی از اکسیژن و در دماهای نسبتاً بالا ($>1273\text{K}$) تشکیل می‌شود. گونه گوگردی SO_3 نیز در دماهای نسبتاً پایین در اثر اکسیداسیون SO_2 با اکسیژن اضافی هوا تولید می‌شود. بنابراین در نواحی مشعل سوخت کمکی خاکاره که دما نسبتاً پایین است واکسیژن اضافی موجود است، کسر جرمی SO_3 افزایش یافته است.

در نمودار ۵ تغییرات آلاینده‌های SO_2 در محور گذرنده از مشعل کنسانتره سولفیدی و CO در محور گذرنده از مشعل سوخت کمکی نشان داده شده است. با توجه به نمودار ۵ نتایج نشان می‌دهد که مقدار SO_2 تولیدی در طول محور افزایش می‌یابد. مقدار SO_2 حاصل

ترکیبات موجود در آن مصرف می‌شود. اما فرآیند تبخیر و اکسیداسیون قطرات سوخت گازوئیل بسیار سریع انجام می‌شود. علاوه بر این گازوئیل ارزش حرارتی بالاتری دارد. با توجه به نمودار ۲ مشاهده می‌شود که تفاوت زیادی بین بیشینه دمای کوره در احتراق گازوئیل و خاکاره وجود ندارد. هرچند مقدار NO_x حرارتی تولیدی با تغییرات دما رابطه مستقیم دارد. اما با توجه به این که در ترکیب خاکاره نیتروژن وجود دارد، NO_x تولیدی در اثر احتراق خاکاره مقدار بیشتری مشاهده شده است. مقدار CO_2 تولیدی در احتراق گازوئیل بیشتر است. زیرا در احتراق گازوئیل مقدار کربن بیشتری از تبخیر قطرات سوخت مایع آزاد و واکنش می‌دهد که این باعث افزایش دما و کسر جرمی CO_2 شده است.

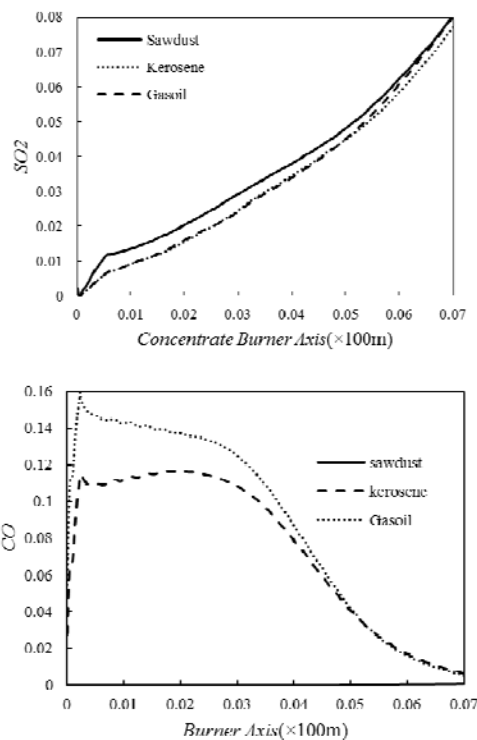


نمودار ۱) اثر تعداد گره‌ها بر توزیع دمای داخل کوره



نمودار ۲) توزیع دما و گونه‌های NO_x و CO_2 در کوره فلش برای دو سوخت کمکی (الف) خاکاره و (ب) گازوئیل

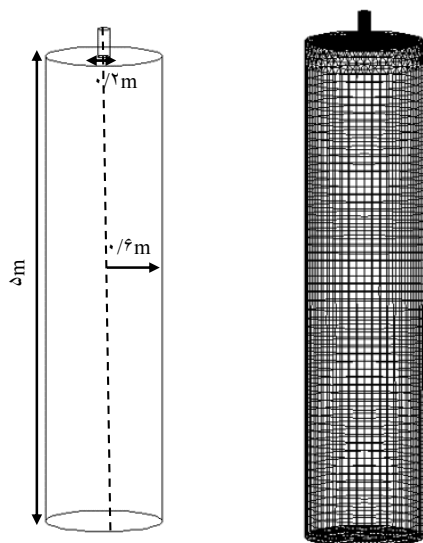
در نمودار ۳ نمودار تغییرات دما و آلاینده NO_x برای ۳ سوخت گازوئیل، نفت و خاکاره در محور گذرنده از مشعل سوخت کمکی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای هر ۳



نمودار ۵) مقایسه کسر جرمی SO_2 و CO به ترتیب در محور گذرنده از مشعل کنسانتره و سوخت کمکی

جدول ۴) شرایط مرزی کوره فلش آزمایشی اتوکمپو^[17]

دبی هوای ورودی	
۴۶۳K	دمای هوای ورودی
%۲۸	اکسیژن موجود در هوا
۹۶.Kg/h	دبی کنسانتره ورودی
Cu= ۱۸/۱	ترکیب شیمیایی کنسانتره ورودی
Fe= ۳۵/۸	
S= ۳۵/۵	
SiO ₂ = ۵	
۵۰μm	اندازه ذرات کنسانتره
۴۳۰۰.kg/m ³	چگالی ذرات کنسانتره
۱۴۷۳K	دمای دیواره‌های کوره

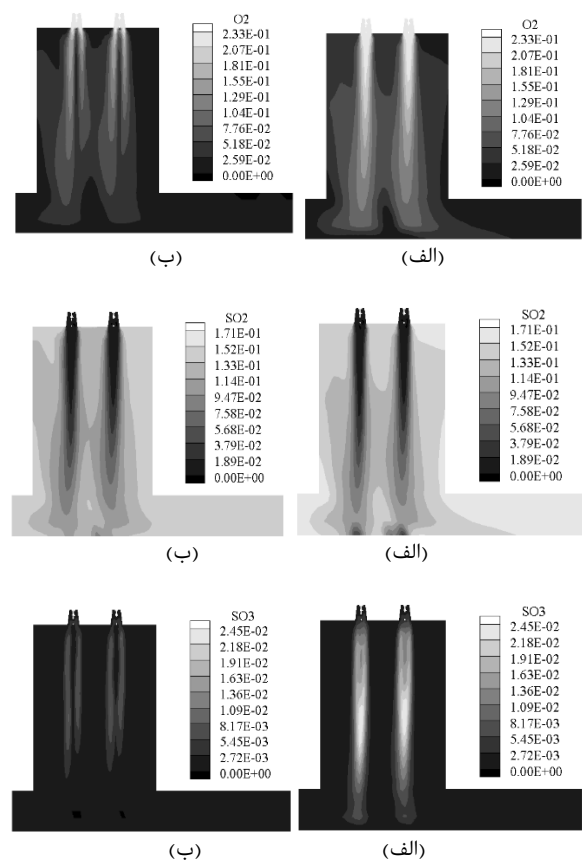


شکل ۳) هندسه و شبکه‌بندی سه‌بعدی از کوره فلش آزمایشی اتوکمپو

از احتراق خاکاره بیشتر از مقدار حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی نفت و گازوئیل است. زیرا در احتراق سوخت‌های فسیلی مقدار زیادی کربن در اثر تبخیر قطرات سوخت مایع آزاد می‌شود که در مصرف اکسیژن با گوگرد موجود در ذرات کنسانتره رقابت می‌کند بنابراین مقدار SO_2 کمتری تولید می‌شود. اما با توجه به اینکه در ترکیب خاکاره اکسیژن وجود دارد و کربن کمتری از تبخیر ترکیبات آن آزاد می‌شود مقدار زیادی اکسیژن برای اکسیداسیون گوگرد موجود در ذرات در دسترس است. همچنین با توجه به نمودار ۵ مشخص است که CO تولیدی در اثر احتراق خاکاره در مقایسه با سوخت‌های فسیلی بسیار ناچیز است. برای سوخت‌های فسیلی کسر جرمی CO در نواحی بالای کوره ابتدا افزایش و سپس در اثر اکسیداسیون و تبدیل به CO_2 کاهش می‌یابد.

۴-۲- اعتبارسنجی

برای بررسی صحت مدل‌سازی ریاضی انجام شده در این مقاله، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده کوره آزمایشگاهی شرکت اتوکمپو مقایسه شده‌اند. از شرایط واقعی کوره آزمایشگاهی برای انجام شبیه‌سازی استفاده شده است^[17] (جدول ۴). کوره آزمایشگاهی یک استوانه عمودی است که مخلوط کنسانتره و جریان هوا از طریق دهانه ورودی به داخل آن تزریق می‌شوند. در شکل ۳ نمایی از هندسه و شبکه‌بندی کوره نشان داده شده است. محیط حل از ۲۰۸۳۵ گره محاسباتی تشکیل شده است. با توجه به تغییرات شدید در نواحی بالای کوره، در این نقاط از شبکه با تراکم بیشتر استفاده شده است.



نمودار ۴) توزیع گونه‌های O_2 و SO_2 و SO_3 در کوره فلش برای دو سوخت کمکی (الف) خاکاره و (ب) گازوئیل

افزایش یافته است. مقدار تولید گونه‌های کربنی CO و CO₂ حاصل از احتراق سوخت‌های گازوئیل و نفت بسیار بیشتر از مقدار حاصل از احتراق خاکاره است. در اثر احتراق خاکاره با وجود مقدار زیاد اکسیژن در دسترس غلظت گونه‌های گوگردی SO₂ و SO₃ حاصل از احتراق کنسانتره‌های سولفیدی به ترتیب در نواحی دما بالا و پایین کوره افزایش یافته است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

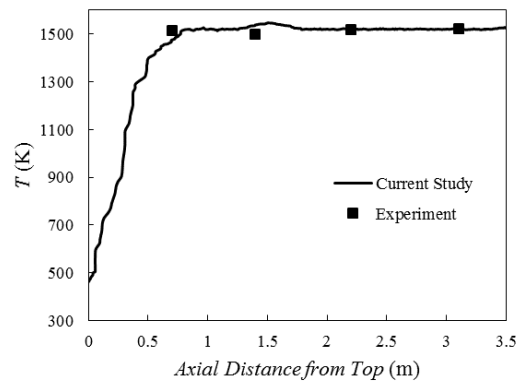
۶- فهرست علائم

عدد ثابت	C_d
عدد ثابت	C_g
ظرفیت گرمایی ویژه (KJkg ⁻¹ K ⁻¹)	c_p
کسر مخلوط	f
واریانس کسر مخلوط	f'
آنتالپی واکنش (Jkg ⁻¹)	H
آنتالپی تشکیل گونه j در دمای مبنا (Jkg ⁻¹)	$h_j^\circ(T_{ref,j})$
انرژی جنبشی تلاطمی (m ² s ⁻²)	k
هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	k_t
کسر جرمی گونه j	m_j
کسر مخلوط بی‌بعد جریان ثانویه	p_{sec}
تابع چگالی احتمال	p
جمله چشمه ناشی از انتقال حرارت	S_h
جمله چشمه ناشی از انتقال جرم	S_m
دما (K)	T
سرعت (ms ⁻¹)	u, v, w
علائم یونانی	
آنتالپی واکنش (KJmol ⁻¹)	$\Delta \bar{h}$
نرخ اتلاف تلاطمی (m ² s ⁻³)	ε
لزجت گردابه‌ای (kgm ⁻¹ s ⁻¹)	μ_t
چگالی (kgm ⁻³)	ρ
عدد ثابت	σ_t

منابع

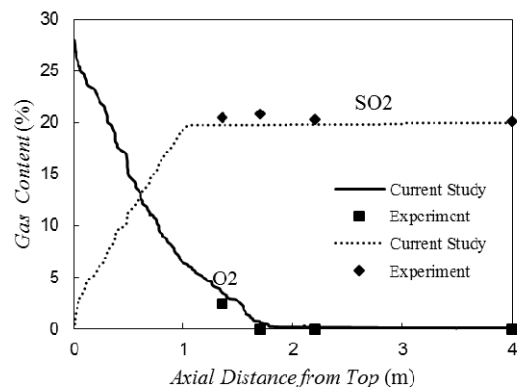
- 1- Barmina I, Valdmanis R, Zake M. The effects of biomass co-gasification and co-firing on the development of combustion dynamics. Energy. 2017;146:4-12.
- 2- Beagle E, Belmont E. Technoeconomic assessment of beetle kill biomass co-firing in existing coal fired power plants in the Western United States. Energy Policy. 2016;97:429-438.
- 3- Agbor E, Oyedun AO, Zhang X, Kumar A. Integrated techno-economic and environmental assessments of sixty scenarios for co-firing biomass with coal and natural gas. Applied Energy. 2016;169:433-449.
- 4- Peña B, Bartolomé C, Gil A. Analysis of thermal resistance evolution of ash deposits during co-firing of coal with biomass and coal mine waste residues. Fuel. 2017;194:357-367.
- 5- Priyanto DE, Ueno S, Sato N, Kasai H, Tanoue T, Fukushima H. Ash transformation by co-firing of coal with high ratios of woody biomass and effect on slagging propensity. Fuel. 2016;174:172-179.
- 6- Pérez-Jeldres R, Cornejo P, Flores M, Gordon A, García X. A modeling approach to co-firing biomass/coal blends

در نمودار ۶ تغییرات دمای حاصل از شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی در محور مرکزی کوره نشان داده شده است. در نمودار ۶ مشاهده می‌شود در نواحی ورودی کوره با ورود واکنش‌دهنده‌های سرد دما به تدریج افزایش می‌یابد تا به یک مقدار نسبتاً ثابتی در امتداد محور کوره برسد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با مقادیر اندازه‌گیری تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.



نمودار ۶) مقایسه دمای پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده

در نمودار ۷ تغییرات کسر جرمی SO₂ و O₂ حاصل از شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری‌شده در محور مرکزی کوره نشان داده شده است. با توجه به نمودار ۷ با شروع احتراق و مصرف اکسیژن ورودی در امتداد محور کوره به تدریج کسر جرمی آن کاهش می‌یابد تا در نهایت به صفر می‌رسد. کسر جرمی SO₂ نیز در امتداد محور مرکزی کوره تا رسیدن به مقدار ثابتی افزایش پیدا می‌کند. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و مقادیر اندازه‌گیری غلظت گونه‌های SO₂ و O₂ تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.



نمودار ۷) مقایسه غلظت SO₂ و O₂ پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله احتراق هم‌زمان کنسانتره‌های سولفیدی و ۳ سوخت گازوئیل، نفت و زیست‌توده خاکاره به عنوان سوخت کمکی با هدف مقایسه دمای کوره و آلاینده‌های تولیدی شبیه‌سازی عددی شده است. نتایج حاصل نشان داد دمای شعله حاصل از احتراق زیست‌توده خاکاره پایین‌تر از دمای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی نفت و گازوئیل است. زیرا ارزش حرارتی آن نسبت به نفت و گازوئیل بسیار پایین می‌باشد. با توجه به این که در ترکیب شیمیایی خاکاره نیتروژن وجود دارد کسر جرمی آلاینده NO_x مقدار زیادی

potential solid fuels. The Malaysian Journal of Analytical Sciences. 2014;18(3):724-729.

13- Solnordal CB, Jorgensen FRA, Koh PTL, Hunt A. CFD modelling of the flow and reactions in the Olympic Dam flash furnace smelter reaction shaft. Applied Mathematical Modelling. 2006;30(11):1310-1325.

14- ANSYS. ANSYS fluent theory guide [Internet]. Canonsburg: ANSYS Inc; 2011 [Unknown cited]. Available from: Not Found.

15- Moghiman M, Javadi M, Moghiman AR, Baghdar Hosseini S. A numerical study on thermal dissociation of H₂S. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2010;4(2):244-249.

16- Javadi M, Moghiman M. Hydrogen and carbon black production from thermal decomposition of sub-quality natural gas. International Journal of Spray and Combustion Dynamics. 2010;2(1):85-101.

17- Hahn YB, Sohn HY. Mathematical modeling of sulfide flash smelting process: Part I. Model development and verification with laboratory and pilot plant measurements for chalcopyrite concentrate smelting. Metallurgical Transactions B. 1990;21(6):945-958.

in pulverized coal utility boilers: Synergistic effects and emissions profiles. Energy. 2017;120:663-674.

7- Shirneshan A, Jamalvand H. Numerical investigation of combustion of biomass, methane, and gasoil fuels and emissions from a furnace chamber. Energy and Policy Research. 2016;3(1):19-26.

8- Zaim EH, Mansouri SH. A new mathematical model for copper concentrate combustion in flash smelting furnaces. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2017;231(2):119-130.

9- Li Xf, Mei C, Xiao T. Numerical modeling of Jinlong CJD burner copper flash smelting furnace. Journal of University of Science and Technology Beijing. 2002;9(6):417-421. [Chinese]

10- Ahokainen T, Jokilaakso A. Numerical simulation of the outokumpu flash smelting furnace reaction shaft. Canadian Metallurgical Quarterly. 1998;37(3-4):275-283.

11- Jorgensen FRA, Koh PTL. Combustion in flash smelting furnaces. JOM. 2001;53(5):16-20.

12- Wan Azlina WKG, Gabriel DS, Azil Bahari A. Physico-chemical characterizations of sawdust-derived biochar as