



Experimental study and Numerical Optimization for the Burner Geometry Parameters of Preheated Furnace at Esfarayen Steel Industrial Complex

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hatami M.^{1*}
Gholipour A.²

How to cite this article

Hatami M, Gholipour A. Experimental study and Numerical Optimization for the Burner Geometry Parameters of Preheated Furnace at Esfarayen Steel Industrial Complex. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(7):479-488.

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

² Esfarayen Industrial Complex, Esfarayen, North Khorasan, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, North Khorasan, Iran.

m-hatami@um.ac.ir

Article History

Received: July 17, 2020

Accepted: April 20, 2021

ePublished: June 19, 2021

ABSTRACT

In this research, the geometric parameters of a preheated furnace burner in the press line of Esfarayen Industrial Complex have been studied, experimentally and numerically. To improve the combustion process in the burner, three different diameters (10, 20, and 30 mm) are provided for the nozzle diameter and three different lengths (225, 250, and 300 mm) for the mixing length of the burner. Ansys-Fluent software and RNG k- ϵ turbulence model have been used for the simulation and the modeling results show that the applied method has good accuracy and with a maximum error of 23% higher than the experimental values for temperature. This temperature difference is due to the lack of accurate measurement of inlet airflow and also point measurement of temperature in the burner. In the study of the effect of nozzle diameter, it was observed that by increasing the nozzle diameter from 10 to 30 mm, the maximum temperature inside the burner increased by 6%, which against a slight increase in nitrogen oxides (Nox) pollutants inside the burner, the 30 mm diameter for optimum design is selected among the tested diameters. Also, the results of the study for the effect of mixing length on burner performance have shown that by increasing the length, the amount of heat produced decreases slightly, which due to more favorable stability of NOx pollutants due to more space and complete reaction, length of 300 mm has been chosen for the optimal design of the burner.

Keywords Combustion, Burner, Gas Usage, Optimization, Esfarayen Industrial Complex

CITATION LINKS

[1] Energy Balance Sheet ... [2] Numerical investigation of the combustion process ... [3] Design and analysis of moderate or intense low-oxygen dilute combustion burner [4] Numerical study on a novel burner designed ... [5] Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NOX emission [6] Evaluation of flamelet-based combustion models for the use in a flameless burner under different operating conditions [7] Fuel interchangeability for lean premixed combustion in cylindrical radiant burner operated in the internal combustion mode [8] Numerical evaluation of a novel double-concentric swirl burner for sulfur combustion [9] Combustion model evaluation in a CFD simulation ... [10] Experimental investigation of flame stability ... [11] Effects of porous media on partially premixed combustion and heat transfer ... [12] Transient ellipsoidal combustion model for a porous burner in microgravity [13] Combustion characteristics of blast furnace gas in porous media burner [14] Identification and Prioritization of Energy Consumption Strategies ... [15] Investigation of performance and optimization of thermal efficiency of a gas furnace by experimental method and its simulation using FIHR software [16] Investigation of new methods to reduce heat loss and optimize energy consumption in furnaces [17] Investigating the effect of recuperator on increasing efficiency and recycling heat losses of Mobarakeh Steel hot rolled preheating furnaces. First national conference on burner and industrial furnaces [18] Investigating energy saving opportunities in preheated furnaces of steel mills with the help of PHAST software [19] Reduction of fuel consumption in an industrial glass melting furnace [20] Effect of burners configuration on performance of heat treatment furnaces [21] Investigation of AHP-JoHarry models for increasing the relation between Esfarayen Industries and Universities

مطالعه تجربی و بهینه‌سازی عددی پارامترهای هندسی مشعل در کوره پیش گرم خط پرس مجتمع صنعتی فولاد اسفراین

محمد حاتمی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

علی قلی‌پور

اداره کل تعاون، کار و رفاه اجتماعی استان خراسان شمالی، مجتمع صنعتی فولاد اسفراین، اسفراین، ایران

چکیده

در این پژوهش به مطالعه تجربی و مدلسازی پارامترهای هندسی یک مشعل کوره پیش گرم در خط پرس مجتمع صنعتی اسفراین پرداخته شده است. جهت بهبود فرآیند احتراق در مشعل، سه قطر مختلف (۲۰، ۱۰، ۳۰ میلی‌متر) برای نافی و سه طول مختلف (۲۵۰، ۲۲۵، ۳۰۰ میلی‌متر) برای طول اختلاط مشعل در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی از نرم افزار انسیس-فلوئنت و از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ -RNG استفاده شده است و نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که روش اعمال شده دقت خوبی داشته و حداکثر با ۲۳٪ خطا مقادیری بیشتر از مقادیر تجربی برای دما نشان می‌دهد که این اختلاف دما به علت عدم اندازه گیری دقیق دبی هوای ورودی و همچنین اندازه گیری نقطه ای دما در مشعل ایجاد شده است. در بررسی اثر قطر نافی مشاهده شده است که با افزایش قطر نافی از ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر، بیشینه دمای داخل مشعل ۶٪ افزایش داشته است که در برابر افزایش ناچیز آلایندگی نیتروژن در داخل مشعل، از بین قطر های انتخابی قطر ۳۰ میلی‌متر برای طراحی بهینه انتخاب شده است. همچنین نتایج بررسی اثر طول اختلاط بر عملکرد مشعل نشان داده است که با افزایش طول، میزان گرمای تولیدی بطور ناچیزی کاهش پیدا می‌کند که با توجه به پایداری مطلوب تر آلایندگی های اکسید نیتروژن بعلا فضا بیشتر و واکنش کاملتر، طول ۳۰۰ میلی‌متر برای طراحی بهینه انتخاب شده است.

کلیدواژه‌ها: احتراق، مشعل، مصرف گاز، بهینه سازی، مجتمع صنعتی اسفراین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

*نویسنده مسئول: m-hatami@um.ac.ir

۱- مقدمه

صنعت فولاد به عنوان يك صنعت مادر و انرژی بر ۵ درصد کل مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص داده است. غالباً این انرژی از سوخت‌های فسیلی نظیر زغال سنگ (آلایندگی ترین سوخت فسیلی در جهان) تأمین می‌شود. بر اساس اطلاعات و آمار ترازنامه هیدروکربوری، صنعت آهن و فولاد کشور در سال ۱۳۸۶ حدود ۳۰ میلیون بشکه معادل نفت خام انرژی مصرف کرده است. به طور قطع، میزان مصرف انرژی صنعت آهن و فولاد کشور با توجه به توسعه چشمگیر آن طی سال‌های اخیر بسیار بیشتر از میزان سال ۱۳۸۶ است که به دلیل در دسترس نبودن داده‌های رسمی و قابل استناد، در اینجا ارائه نشده است^[1]. کوره ها و مشعل ها به عنوان عامل اصلی مصرف انرژی در صنعت فولاد و همچنین تولید آلایندگی های مختلف شناخته می‌شوند که باعث شده است پژوهشگران

جهت کاهش مصرف انرژی و کاهش آلایندگی ها روی مشعل ها مطالعات زیادی انجام دهند که در اینجا مختصراً به برخی پژوهش هایی که در این زمینه در جهان و ایران انجام شده است، اشاره می‌شود.

گیل و همکاران^[2] به بررسی احتراق مشعلهای چرخشی در کوره بویلرهای T شکل پرداختند. آنها با بررسی احتراق دو نوع زغال سنگ نشان دادند که داده های بدست آمده از حل عددی آنها به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. آنها همچنین نشان دادند که جایگزینی زغال سنگ زمانی می‌تواند نتایج قابل قبولی داشته باشد که زاویه چرخش مشعل برای هوای ثانویه ۵۰ درجه و برای مخلوط هوا-سوخت در ۴۵ درجه قرار داده شود. کومار و همکاران^[3] به طراحی و تحلیل مشعل احتراقی کم اکسیژن با رقیق سازی متوسط و شدید (MILD) به کمک نرم افزار انسیس پرداختند و نشان دادند که دمای احتراق اینگونه مشعل ها کمتر از مشعل های عادی است که باعث کاهش دمای احتراق و متعاقباً کاهش اکسیدهای نیتروژن (NOx) می‌شود. ژی و همکاران^[4] به طراحی مشعلی جدید که رفتار احتراق MILD را در شرایط احتراق با اکسیژن غنی بهبود بخشد، پرداختند. در واقع آنها با طراحی یک مسیر از بخارگاز ایجاد عایق بین اکسیژن و سوخت کردند که به این وسیله واکنش سریع بین اکسیژن و سوخت را به تعویق انداخته تا بتوانند شرایط احتراق MILD را زودتر ایجاد کنند و با این طرح میزان آلایندگی NOx را کاهش دهند. آنها با مدلسازی عددی سه غلظت مختلف برای اکسیژن (۱۹/۵٪، ۲۳٪ و ۲۶/۵٪) در نظر گرفته و نشان دادند که دمای خط مرکزی مشعل بین ۲۴-۵۴٪ کاهش یافته است و مقدار آلایندگی NOx به ترتیب ۱/۸، ۱/۵ و ۱/۲ برای درصدهای مختلف اکسیژن کاهش داشته است.

مطالعه دیگری که اخیراً در زمینه کاهش آلایندگی NOx در احتراق مشعل ها توسط آنوفریو و همکاران^[5] انجام شده است، به بررسی کاهش این آلایندگی به کمک بخار در احتراق سوخت دیزلی و روغن های بازیافتی پرداخته شده است. در مطالعه آزمایشگاهی آنها سوخت به کمک بخارسوپرهیت با سرعت بالا اسپری شده که نشان دادند آلایندگی NOx برای سوخت دیزلی در این شرایط تا ۵۵٪ و برای سوخت روغن بازیافتی تا ۲۵٪ کاهش داشته است. چنین جهت کاهش آلایندگی ها استفاده از مشعل های احتراق بدون شعله اخیراً مورد استفاده قرار گرفته است. مایروف و همکاران^[6] به ارزیابی احتراق بدون شعله در شرایط مختلف پرداختند. احتراق های بدون شعله که در واقع جبهه شعله در آنها وجود نداشته و به کمک پیشگرم کردن هوا ایجاد می‌شود، در شرایط غیرپیش آمیخته مناسب تر بوده و با کاهش ورودی گرمایی، بیشینه دمای محلی احتراق در ناحیه واکنش از ۱۴۵۰ تا ۱۵۳۰ درجه سانتیگراد افزایش و آلایندگی NOx از ۳۲ تا ۸۸ppm افزایش می‌یابد.

مازنوی و همکاران^[7] به بررسی احتراق رقیق پیش آمیخته در یک مشعل استوانه ای با سوختهای گاز طبیعی، بایوگاز و سینگاز

راندمان و کاهش مصرف سوخت آرایه داده که می‌توان به سیستم کنترلی برای دریچه‌های تنظیم هوای اضافی، استفاده از خشک کن یا فیلتر هوا، استفاده مجدد گاز داغ خروجی از برج در حال سرد شدن به عنوان سیال عملیاتی ورودی به کوره و استفاده از کوره با دو مشعل روشن به جای سه مشعل اشاره نمود.

خاکپور و مومنی^[16] در پژوهش خود به بررسی عوامل موثر در کاهش اتلاف حرارتی در کوره‌ها و استفاده از روش‌های نوین جهت اعمال مدیریت انرژی در فرآیند بهینه‌سازی مصرف سوخت پرداختند. کاهش هوای اضافی تا ۱۵ درصد، پیش گرم کردن هوای احتراق، عایق کاری بدنه کوره به منظور کنترل دمای بدنه در ۸۲ درجه و اتلاف حرارت کمتر از آن تا ۲ درصد از عناوین موثر بررسی شده توسط ایشان در این تحقیق بوده است. همچنین نقش کیفیت، نوع سوخت و نوع مشعل‌ها از دیگر عوامل بررسی شده در این تحقیق است که از سایر عوامل یاد شده در بازدهی کوره‌ها دارای اهمیت بیشتری می‌باشد. به طور کلی برای مشعل‌های معمولی هوای اضافی لازم جهت احتراق گاز تا ۱۰ تا ۱۵ درصد و برای احتراق نفت کوره ۲۵ تا ۳۰ درصد طراحی می‌گردد که تاثیر بسزایی در بازدهی کوره و سوخت مصرفی دارد، در حالی‌که امروزه در دنیا عموماً از مشعل‌های نوع (هوای اضافی کم) و یا نوع مرحله سوزاندن استفاده می‌گردد که فقط ۳ تا ۵ درصد نیاز به هوای اضافی دارند و به علاوه مسئله انتشار آلاینده‌های اکسید نیتروژن در آن به حداقل رسانده شده است. آنها پیشنهاد دادند که مشعل‌ها باید طوری انتخاب شوند که با فضای هندسی کوره تناسب داشته باشند و وضعیت عملکرد مشعل‌ها نیز باید دائماً زیر نظر باشد.

در مطالعه ای دیگر در صنعت فولاد، علی کویتی^[17] به بررسی تأثیر رکوپراتور برافزایش راندمان و بازیافت تلفات حرارتی کوره‌های پیش گرم نورد گرم فولاد مبارکه پرداخته است. در این پژوهش به بررسی و آنالیز حرارتی رکوپراتور به عنوان سیستم بازیافت حرارت در دودکش کوره‌های پیش گرم نورد گرم شرکت فولاد مبارکه پرداخته شده و با محاسبه تلفات حرارت خروجی از دودکش‌ها، راندمان رکوپراتورهای موجود و عملکرد سیستم بازیافت انرژی در بازه کاری کوره‌ها به کمک تحلیل‌های عددی و اندازه‌گیری‌های عملی محاسبه شده است. بر اساس این آنالیز، عملکرد محاسبه شده موجود را با مقادیر طراحی کوره که توسط شرکت ایتالیایی سازنده اعلام شده، مورد مقایسه و تحلیل قرار داده اند و اثر سیستم بازیافت انرژی و راندمان حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. کویتی بر اساس تحقیقات به این نتیجه رسیده است که راندمان رکوپراتورهای موجود کمتر از نیمی از راندمان رکوپراتورهای مشابه در شرایط طراحی هست و عملکرد بازیابی حرارت این مبدل در سطح پایینی به سر می‌برد. لذا نتایج بررسی‌های انجام شده با در نظر گرفتن جنبه‌های علمی و اقتصادی پروژه پیشنهاد داده است که نسبت به تعویض رکوپراتورهای موجود و جایگزین کردن

پرداختند و اثر نسبت ترکیب سوخت و هوا و نوع سوخت را روی آلاینده‌های NOx و CO، بازدهی تشعشع و حدود پایداری شعله مطالعه کردند و نشان دادند در تمامی شرایط سوخت‌ها، مشعل بصورت پایدار عمل کرده و مقادیر بازده تشعشعی بین ۳۰-۴۵٪ و مقدار آلاینده NOx بین ۱۰-۵۰ ppm و آلاینده CO بین ۰-۱۰ ppm قرار دارد. ژانگ و همکاران^[8] به طراحی عددی یک مشعل چرخشی هم محور برای احتراق سولفور پرداختند. در طرح آنها با معرفی نازل‌های متفاوت با پاشش و توربولانسی و پایداری زیاد به کاهش آلاینده NOx کمک کردند. همچنین طراحی دیگری برای مشعل‌های لوله-تشعشعی توسط گارسیا و همکاران^[9] ارائه شده است که بدون گردش مجدد طراحی شده و احتراق آن در یک محفظه احتراق رخ می‌دهد که نتایج آنها به صورت دو بعدی و عددی تحلیل شده است.

استفاده از احتراق در محیط‌های متخلخل راهکار دیگری جهت کاهش میزان آلاینده‌ها در مشعل می‌باشد. بابنوبج و همکاران^[10] به صورت آزمایشگاهی به بررسی احتراق پیش آمیخته پروپان و هوا در یک مشعل متخلخل دو بخشی پرداختند و با استفاده از مواد سرامیکی با تخلخل‌های متفاوت نشان دادند که مقادیر آلاینده‌های اکسید نیتروژن و کربن مونوکسید از مقادیر بسیار ناچیزی فراتر نمی‌رود. همچنین چن و همکاران^[11] با استفاده از محیط متخلخل احتراق در مشعل‌ها با سوخت اتانول و با اندازه‌های متوسط را بهبود دادند. همچنین مارکان و همکاران^[12] و هی و همکاران^[13] در مطالعاتی جداگانه به نقش مهم محیط متخلخل در بهبود نتایج احتراق و کاهش آلاینده‌ها در مشعل‌هایی متفاوت پرداختند.

از جمله پژوهش‌های انجام شده در کشور و در صنعت فولاد میتوان به پژوهش آقاجانی و همکاران^[14] اشاره کرد که با استفاده از فن‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، با مطالعه موردی فولاد آلیاژی ایران، برای ارتقای بهره‌وری انرژی با تلفیق چرخه دمینگ و فن‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، به یک مدل رسیده‌اند. در این مدل ابتدا عوامل بالا بودن شاخص مصرف تعیین گردید و در ادامه با مطالعه کتابخانه‌ای و استفاده از نظر متخصصان، معیارها و عوامل کیفی مؤثر در ارزیابی راهکارهای بهبود مصرف انرژی در صنعت فولاد آلیاژی ایران شناسایی کردند. سپس با استفاده از پرسشنامه، وزن معیارهای تصمیم‌گیری به روش آنتروپی را محاسبه نمودند و راهکارهای به‌دست‌آمده را با فن‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره رتبه‌بندی نمودند و در نهایت مهم‌ترین راهکارها برای اجرا در فولاد آلیاژی ایران را به ترتیب کنترل دمای کوره پیش گرم و پایین آوردن درجه حرارت خروجی کوره پیش گرم اعلام نمودند. همچنین، رسولی^[15] در مطالعه ای، پارامترهای موثر بر راندمان حرارتی و سوخت مصرفی کوره با مقادیر اندازه‌گیری شده را مقایسه کرد و با توجه به اصول طراحی کوره‌ها و شرایط واقعی کاری آنها در پالایشگاه، چند راهکار عملی برای بهینه‌سازی

طویل، قطعات و مقاطع آهنگری و ریخته گری شده در ایران و منطقه خاورمیانه می باشد. مجتمع در حال حاضر برای صنایعی نظیر نفت و گاز، معدن، راه آهن، نیروگاهی، فولاد های ابزار، کشتی سازی، سیمان، قطعات و مقاطع فولادی مورد نیاز را تامین می کند و محصولات مختلف مجتمع به کشورهای نظیر آلمان، ایتالیا، بلغارستان صادر گردیده است. این مجتمع در کیلومتر ۱۲ جاده اسفراین به جنورد واقع شده و دارای واحد هایی به این شرح است: ذوب و ریخته گری، آهنگری و پرس، ماشینکاری، کنترل کیفیت. (شکل ۱) [21].

۱-۲- مشخصات کوره پیش گرم مورد مطالعه در مجتمع صنعتی اسفراین

مطالعه حاضر روی مشعل های کوره پیش گرم مجتمع صنعتی اسفراین صورت گرفته است. این کوره برای عملیات حرارتی شمش های آهنگری شده تا دمای 1250°C بکار می رود. کوره دارای یک درب در انتهای سازه می باشد که سیستم بالابر درب الکترومکانیکی می باشد. شمش های فولادی بوسیله یک واگن داخل و از آن خارج می گردد. جابجایی واگن بوسیله شانه دنده متصل به زیر واگن و گیربکس راننده در نزدیک درب کوره انجام می شود. محرک سیستم درایو واگن الکتریکی می باشد و کف واگن بوسیله آجرهای نسوز و عایق پوشیده شده است. دیواره های داخلی کوره و درپها بوسیله لایه های مناسب پشم سرامیک و پشم سنگ عایق بندی شده اند که بیشینه دمای تحمل کوره تا 1300°C درجه سانتی گراد می باشد.

سازه کوره از مقاطع فولادی ساخته شده است و شامل بدنه، واگن و درپها می شود. بدنه کوره از تعدادی قاب که شامل دیواره ها و سقف می شود، تشکیل شده است. قابها از مقاطع فولاد ساختمانی (ST37) به روش جوشکاری ساخته شده اند و به وسیله پیچ و مهره بهم متصل می شوند. ورقهای فولادی از داخل به مقاطع بدنه جوش داده شده اند تا داخل سازه بدنه سطحی یکنواخت برای قرار گرفتن عایقها به وجود آید. ضخامت این ورقها در محل اتصال مشعلها برابر 10mm بدون خم و در سایر قسمتها 3mm با خم در قطرها می باشد. برای جلوگیری از گرم شدن سازه، بدنه کوره هنگام



شکل ۱) کوره قوس الکتریکی مجتمع صنعتی فولاد اسفراین

رکوپراتورهای ترکیبی (تثعشعی- جابه‌جایی) اقدام گردد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داده است که رکوپراتور تثعشعی - جابه‌جایی راندمانی نزدیک به دو برابر رکوپراتورهای غیرترکیبی در شرایط مشابه را دارند و به‌طور قابل توجهی در بهینه‌سازی مصرف انرژی مؤثر خواهد بود. توکلی و صدری [18] در تحقیقی به بررسی فرصت‌های صرفه‌جویی انرژی در کوره های پیش گرم کارخانه های فولاد به کمک نرم‌افزار PHAST پرداختند. آنها مقاله یک کوره پیش گرم نمونه ساخته شده توسط شرکت دانیلی را به کمک نرم‌افزار PHAST شبیه‌سازی کردند و با توجه به نتایج شبیه سازی، بیشترین سهم اتلاف انرژی مربوط به اتلافات دود خروجی از دودکش با ۲۵ درصد از مصرف کل انرژی کوره عنوان شد. همچنین با بررسی عوامل مؤثر بر میزان اتلاف انرژی دود خروجی مشخص شد که تنظیم نادرست هوای اضافه بیشترین سهم را در اتلافات ناشی از دود خروجی دارد به طوری که به ازای ۱۰ درصد افزایش هوای اضافه، ۷۶/۱ درصد مصرف انرژی کوره پیش گرم افزایش می‌یابد. همچنین خوشمنش و همکاران [19] به بررسی سه راهکار پیشگرم کردن هوا، پیشگرم کردن مواد اولیه و عایق کاری محفظه احتراق جهت کاهش مصرف سوخت در کوره های صنعتی ذوب شیشه پرداختند. رضازاده و همکاران [20] در مطالعه ای به جایابی مشعل های کوره پیش گرم مجتمع صنعتی اسفراین پرداخته اند تا حرارت در بهترین شرایط به قطعه فولاد منتقل شود. نتایج بررسی های آنها نشان می دهد که این سه راه حل، مصرف سوخت را به ترتیب ۹/۵٪، ۱۷٪ و ۳۴٪ کاهش می دهد. با توجه به مطالعات انجام شده و اهمیت کاهش مصرف انرژی و کاهش آلاینده ها در مجتمع صنعتی فولاد اسفراین که پژوهش های بسیار کمی روی آن انجام شده است، در این پژوهش به بررسی عددی و تجربی مشعل کوره پیش گرم مجتمع صنعتی فولاد اسفراین پرداخته شده است و سعی شده است تا نتایج احتراق از طریق بهینه کردن قطر نافی و طول اختلاط مشعل بهبود یابند.

۲- معرفی شرکت مجتمع صنعتی اسفراین

تاریخچه مجتمع صنعتی اسفراین با توجه اینکه از مفهوم استقلال در قطعات فولادی مورد نیاز کشور در فرآیند توسعه صنعتی ایران بعد از انقلاب شکل گرفته است، بسیار منحصر به فرد می باشد. تشکیل مجتمع به سال ۱۳۷۰ بر میگردد. واحد آهنگری، پرس و عملیات حرارتی مجتمع در سال ۱۳۷۷ راه اندازی گردیده است و متعاقباً در سال ۱۳۸۴ واحد فولادسازی نیز به بهره برداری رسیده است. مجتمع صنعتی اسفراین مجموعه ای به نسبت جوان و متمایل به رشد می باشد که پشتوانه دانش فنی شرکتهای تولیدی نظیر GFM آلمان، بوهرلر و اینتکو اتریش، اسکودا از جمهوری چک را با خود به همراه دارد [21]. در حال حاضر و پس از تکمیل واحدهای فولادسازی، آهنگری و پرس، ماشین کاری و عملیات حرارتی یکی از عمده ترین تامین کنندگان فولادهای آلیاژی شامل محصولات

معادلاتی که باید برای این مدل حل شود شامل معادلات بقاء حاکم شامل معادلات مومنتوم، انرژی و جرم (معادلات انتقال گونه ها) برای حالت پایا جریان گاز می باشد [20]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = s^m \quad (1)$$

که ρ دانسیته جریان و u_i اجزای سرعت در جهت x_i و s^m منبع جرمی تولید شده به وسیله یک بنیان حجمی است. معادله دوم از معادلات سه گانه معادله مومنتوم یا حرکت است:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = B_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \times \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + S_i^u \quad (2)$$

P فشار محلی، μ ویسکوزیته دینامیکی S_i^u مومنتوم منابع در جهت های تولیدی، B_i نیروهای بدنه فعال در سیال هستند. معادله پنجم معادله انرژی شامل ترم های آنتالپی است:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \right) \left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u_i P}{\partial x_i} \Phi + S^h \quad (3)$$

H آنتالپی مخصوص Γ_h نسبت ویسکوزیته موثر و عدد پراختل، Φ تابع اتلاف و S^h منبع آنتالپی تولیدی است. تابع اتلاف عبارتست از:

$$\Phi = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

شبهه سازی فرایندهای احتراقی آشفته غیر پیش آمیخته یک طرح موثر برای مدل سازی همزمان مخلوط و واکنش های مربوط به اجزای شیمیایی نیاز دارد. معادله پایستگی دیفرانسیلی جزئی برای هر جز شیمیایی چنین است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_m \partial x_i} \right) + R_i + S_i \quad (5)$$

که m_i کسر جرمی جز شیمیایی ام، σ_m نسبت ثابت دیفیوژن موثر برای جزء i ام به دیفیوژنی مومنتوم آشفته، R_i دبی جرمی تولیدی یا تخلیه شده بوسیله واکنش شیمیایی و منابع دیگر تولید جز است. معادلات کامل احتراق و روش عددی در مرجع [20] قابل مشاهده است.

جهت انجام این شبهه سازی از بین نرم افزارهای تجاری موجود، نرم افزار انسیس-فلوئنت به خاطر توانایی بالای این نرم افزار در مدل سازی احتراق، انتقال حرارت و جریان آشفته انتخاب شد. اولین گام در تحلیل های عددی تولید هندسه می باشد. هندسه ی این محفظه احتراق با استفاده از بخش هندسه نرم افزار گمبیت ایجاد شده است. با توجه به این امر که عملکرد این محفظه به صورت کاملاً پیش مخلوط و جزئی پیش مخلوط می باشد، مدل احتراقی باید بتواند در هر دو حالت رفتار محفظه را به خوبی پیش بینی کند، لذا برای مدل سازی فرآیند احتراق از مدل احتراقی TFC استفاده شد که برای مشعل های EV مناسب می باشد. برای انجام این شبهه سازی از مدل آشفتهگی ϵ -RNG k استفاده شد، زیرا در این مدل نسبت به RSM مدت زمان کمتری صرف اجرای برنامه می شود. نرم افزار استفاده شده از روش حجم محدود برای گسسته

باز شدن درب انتهای بدنه و پیشانی درگاه درب توسط صفحات چدنی پوشانده شده است (شکل ۲). جدول ۱ مشخصات هندسی کوره پیش گرم و جدول ۲ میزان مصرف انرژی در این کوره را نشان می دهد که انرژی از طریق ۱۸ مشعل دوگانه سوز در این کوره مصرف می شود. هوا به صورت خودکار و با فشار ذکر شده در جدول ۲ جهت پودر کردن سوخت و احتراق وارد می شود.

۳- مدل سازی و معادلات حاکم

تاکنون مطالعات زیادی در ارتباط با مدل سازی ریاضی جریان های چرخشی مغشوش که از مفهوم ویسکوزیته مغشوش استفاده می کنند، صورت گرفته است. از میان آنها مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ که از مفهوم ویسکوزیته گردابی استفاده می کند، کاربرد بیشتری به علت نتایج نزدیک تر به داده های آزمایشگاهی داشته است [1]. برای جریان توربولانسی RNG مدل $k-\epsilon$ برای انتقال گونه های شیمیایی واکنش جریان در مدل اتلاف ادی با انتخاب منبع پخش انرژی مورد استفاده قرار می گیرد. فرضیات مورد استفاده در حل عددی عبارتند از: الف - مخلوط متان-هوا به صورت گاز ایده ال فرض شده است. ب - ضخامت دیوار مشعل نادیده گرفته شده است. ج - شرایط بدون لغزش در دیوارهای مشعل فرض شده است.



شکل ۲) نمای از کوره پیش گرم مجتمع صنعتی فولاد اسفراین

جدول ۱) مشخصات ابعادی کوره پیشگرم مورد مطالعه

ردیف	بعد	اندازه (mm)
ابعاد مفید کوره	طول	۸۰۰۰
	عرض	۴۲۰۰
	ارتفاع با ساپورت	۴۶۰۰
	ارتفاع از بالای ساپورتها	۴۲۰۰
ابعاد کوره	طول	۹۰۰۰
	عرض	۴۹۰۰
	ارتفاع از بالای کف واگن	۵۳۰۰

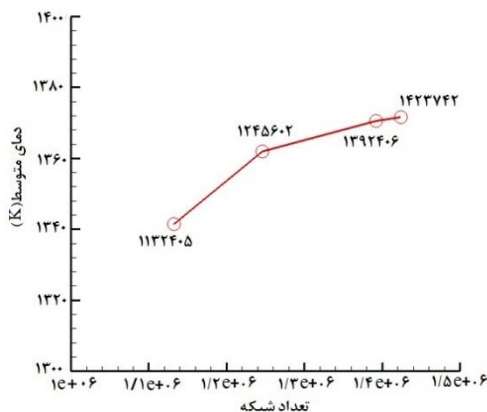
جدول ۲) میزان حداکثر مصرف انرژی در کوره پیش گرم مورد مطالعه

ردیف	نوع ماده سوختنی	حداکثر میزان مصرف
۱	گاز طبیعی	۴۹۰ Nm ³ /h
۲	گازوئیل	۴۲۰ Kg/h
۳	گاز مایع (LPG)	۲۶ Kg/h
۴	برق	۱۲۰ KW، ۲۲۰/۳۸۰ V، ۵۰-HZ
۵	هوا	۱۲۰ mbar، ۹۰۰۰ Nm ³ /h

۴- نتایج

نتایج استقلال از شبکه در شکل ۴ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج دو شبکه آخر مقدار بسیار کمی (برای بیشترین اختلاف، خطای نسبی ۰/۷٪) با یکدیگر اختلاف دارند، در حالیکه از نظر زمان محاسباتی ۳ ساعت با یکدیگر تفاوت داشتند. لذا با توجه به اختلاف کم در دقت محاسبات و صرفه جویی زمان از شبکه با تعداد سلول ۱۴۲۳۷۴۲ استفاده شده است و نحوه شبکه بندی برای دیگر هندسه‌ها مطابق با این مش انتخاب شده است. داده‌های مورد نیاز جهت شبیه‌سازی اولیه و صحنه‌سنجی با داده‌های تجربی به این ترتیب می‌باشد: دبی سوخت $28 \text{ m}^3/\text{hr}$ و دبی حجمی هوا $278 \text{ m}^3/\text{hr}$ و دمای هوای ورودی آن 350 درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. سوخت مورد استفاده متان بوده و از اثر تشعشع گازهای احتراقی صرف نظر شده است. در خروجی محفظه از شرط مرزی فشار استفاده شده است و همچنین در تمام دیواره‌ها از شرط مرزی عدم لغزش استفاده شده است. در دیواره‌های داخلی محفظه معادلات انتقال حرارت حل می‌شود و در پوسته‌های بیرونی محفظه نیز از شرط مرزی آدیاباتیک استفاده شده است. همچنین میزان باقیمانده‌ای که با رسیدن به آن انجام مراحل تکراری حل معادلات متوقف می‌شود 0.00001 در نظر گرفته شده است (معیار همگرایی). نتایج عددی با نتایج تجربی در شکل ۵ نشان داده شده است.

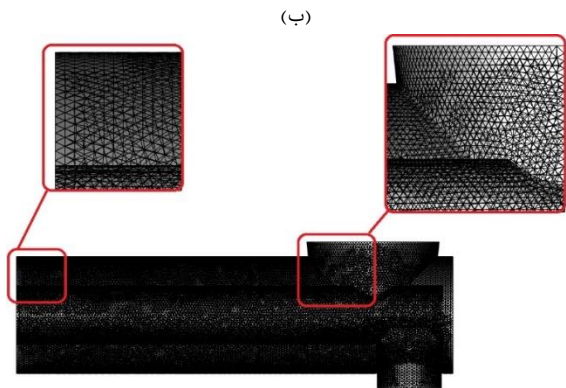
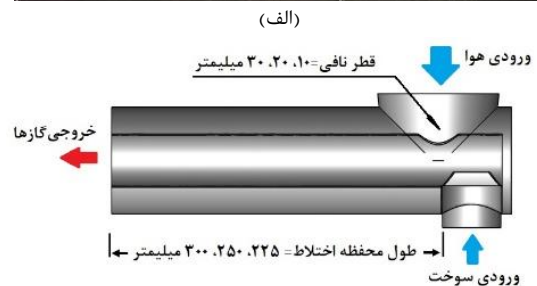
با مشاهده شکل ۵ در می‌یابیم که مقادیر پیش‌بینی شده دما در روش عددی دقت خوبی داشته و حداکثر با ۲۳٪ خطا مقادیری بیشتر از مقادیر تجربی نشان می‌دهد. این اختلاف می‌تواند به علت عدم اندازه‌گیری دقیق دبی هوای ورودی و همچنین اندازه‌گیری نقطه‌ای دما در مشعل می‌باشد، در حالی که در حل عددی میانگین دما در مقطع محاسبه شده است. همچنین دبی واقعی هوای ورودی می‌تواند بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده باشد، زیرا دماهای بالای مشعل در نواحی نزدیک به حالت استوکیومتریک رخ می‌دهد و درصد‌های هوای اضافی بالاتر موجب کاهش دمای مشعل در حالت تجربی می‌شود.



شکل ۴) استقلال شبکه برای ۴ شبکه بندی متفاوت

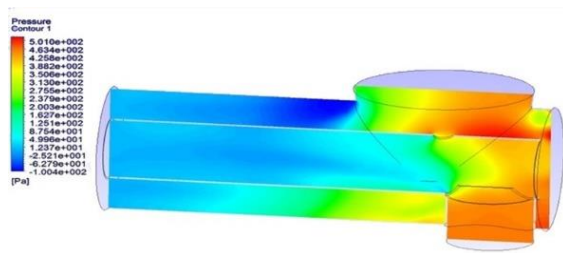
سازی معادلات حاکم استفاده می‌کند و از الگوریتم سیمپل برای حل همزمان سرعت و فشار در معادلات حاکم استفاده شده است. مشعل مورد بررسی و شماتیک آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

دبی هوای ورودی 5000 مترمکعب در ساعت با فشار 110 میلی‌بار و دبی گاز ورودی 490 مترمکعب با فشار 100 میلی‌بار برای 18 مشعل می‌باشد، لذا دبی هوا برای هر مشعل 278 متر مکعب بر ساعت و دبی گاز 28 متر مکعب در ساعت بوده و ظرفیت هر مشعل نیز 350000 کیلو کالری است. همچنین دمای هوای ورودی 350 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. شرایط مرزی برای سوخت و هوای ورودی و شرط خروجی گازها در شکل ۳ نشان داده شده است. هندسه مشعل به صورت سه بعدی و کامل مدل شده است و از مش سه وجهی برای شبکه بندی استفاده شده است. همچنین جهت دقت بیشتر شبکه بندی نزدیک دیواره‌ها بصورت مش لایه مرزی و شبکه بندی ریزتری انتخاب شده است که در شکل ۳ نمونه‌ای از شبکه تولیدی نیز نشان داده شده است.

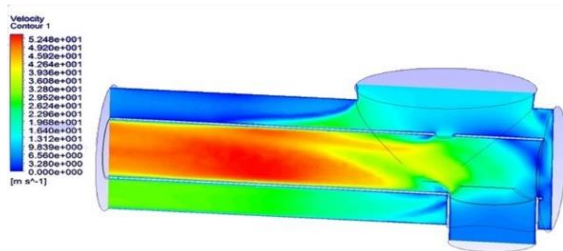


شکل ۳) مدل‌سازی مشعل: الف) مشعل کوره پیش‌گرم، ب) شماتیک مشعل احتراق مدلسازی شده و شرایط مرزی و ج) نمونه شبکه ایجاد شده

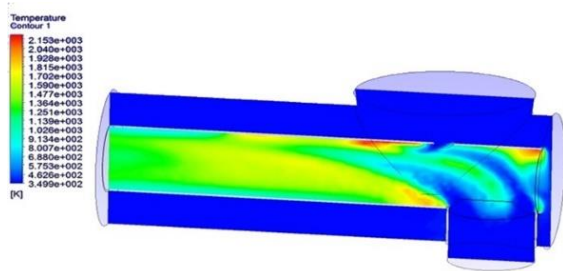
کربن و اکسیدهای نیتروژن (NOx) پرداخته می شود. کانتورهای دما فشار و سرعت در سه قطر نافی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر و طول محفظه اختلاط ۲۲۵ میلیمتری به دست آمده که یک نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۷ توزیع دما برای سه قطر نافی در ۸ نقطه در طول مشعل ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش قطر نافی میزان دمای داخل مشعل افزایش می یابد. با افزایش قطر نافی از ۱۰ تا ۳۰ میلیمتر، بیشینه دمای داخل مشعل ۶٪ افزایش داشته است. علت این امر را می توان افزایش دبی حجمی با افزایش قطر نافی دانست. بدین صورت که با افزایش دبی حجمی، واکنش احتراقی بین مولکول های هوا و سوخت افزایش پیدا کرده و در نتیجه باعث افزایش دمای محفظه احتراق می شود. همچنین در شکل ۸ نیز توزیع اکسیدهای نیتروژن (NOx) در طول محفظه اختلاط در ۸ نقطه رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش قطر نافی و متناسب با آن افزایش دبی حجمی هوای ورودی، میزان این آلاینده افزایش ناچیزی پیدا می کند. با توجه به افزایش قابل توجه دما در برابر افزایش ناچیز آلاینده اکسید نیتروژن در داخل مشعل، از بین قطر های انتخابی قطر ۳۰ میلیمتر برای این مرحله انتخاب می شود.



(الف)

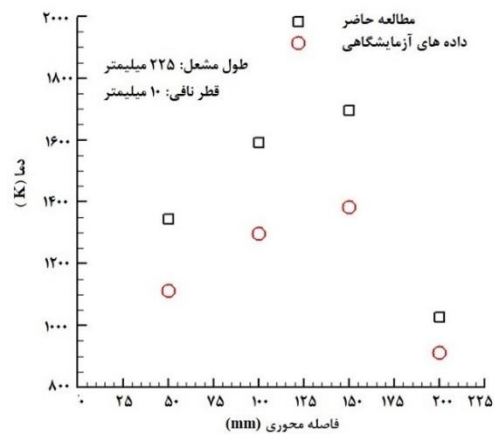


(ب)



(ج)

شکل ۶) کانتور (الف) فشار، (ب) سرعت، (ج) دما برای قطر نافی ۱۰ میلیمتر و طول محفظه ۲۲۵ میلیمتر



شکل ۵) مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی

۴-۱- تجزیه و تحلیل نتایج

برای شبیه سازی عددی این مشعل مدل های به کار رفته در حل عددی توسط فلوئنت در جدول ۳ آمده است. نوع سوخت مورد استفاده در این مشعل گاز طبیعی با ترکیب موجود در جدول ۴ می باشد و برای مدل سازی احتراق از مدل غیر پیش مخلوط استفاده شده است. قابلیت این نرم افزار در مدل سازی گونه های سوخت به این صورت است که گونه های سوخت، نسبت اشتعال پذیری، فشار و دمای مبنا و همچنین گونه هایی که وجود آنها سبب تولید NOx می شود، در نرم افزار وارد می شود. از آنجایی که یک سوخت ممکن است از تعداد زیادی گونه تشکیل شده باشد و حل تمام معادلات این گونه ها زمان و هزینه زیادی را به همراه دارد، لذا خروجی این نرم افزار برای تمام گونه ها یک معادله کلی است که در فرآیند حل نرم افزار فلوئنت قرار می گیرد.

۴-۲- اثر قطر نافی بر پارامترهای سیالاتی و حرارتی

در این قسمت به تاثیر قطر نافی با ثابت نگه داشتن طول محفظه اختلاط بر توزیع دما، فشار، سرعت، اکسیژن، نیتروژن، دی اکسید

جدول ۳) مدل های به کار رفته در حل عددی

حل کننده	Pressure Based
روش فرمول بندی	Implicit
الگوریتم کویپلینگ سرعت فشار	Simple
مدل توربولانسی	k-e RNG
مدلسازی احتراق	Species Transport & Single step mechanism
تقابل شیمی و آشفستگی	Finite rate/Eddy dissipation model
مدل تشعشع	Discrete Ordinates (DO)
روش محاسبه ضریب جذب محیط	WSGGM
مدل سازی	Thermal & Prompt

جدول ۴) مدل های به کار رفته در حل عددی

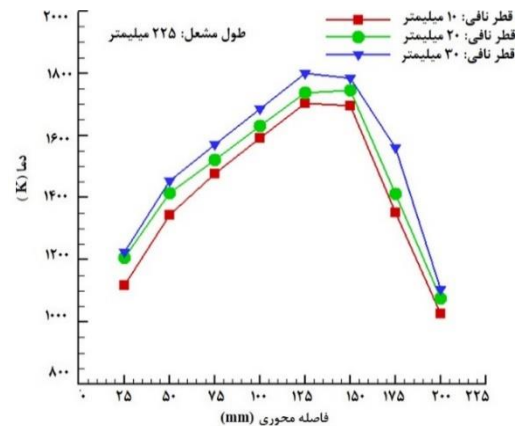
گونه ها	کسر مولی
CH ₄	۰/۹۶۵۰
N ₂	۰/۰۱۳
C ₂ H ₆	۰/۰۱۷
C ₃ H ₈	۰/۰۰۱
C ₄ H ₁₀	۰/۰۰۱
CO ₂	۰/۰۰۳

جدول ۵) اثر قطر نافی بر میزان گرمای تولیدی در طول ۲۲۵ میلی‌متر

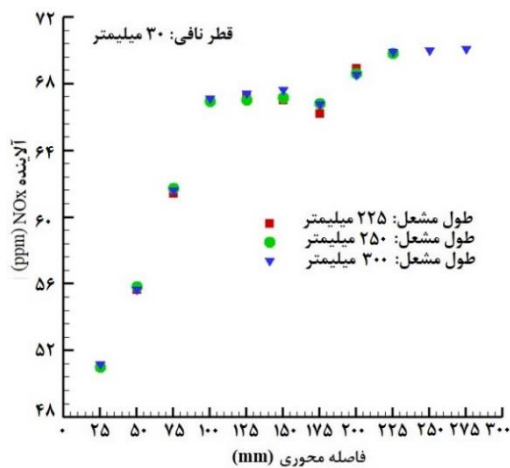
قطر (mm)	Q(I/S)
۱۰	۱۳۳۰۷/۴۳
۲۰	۱۵۸۴۸/۰۷
۳۰	۱۷۴۲۳/۱۸

جدول ۶) دما، سرعت و فشار میانگین در محفظه اختلاط در سه طول مختلف

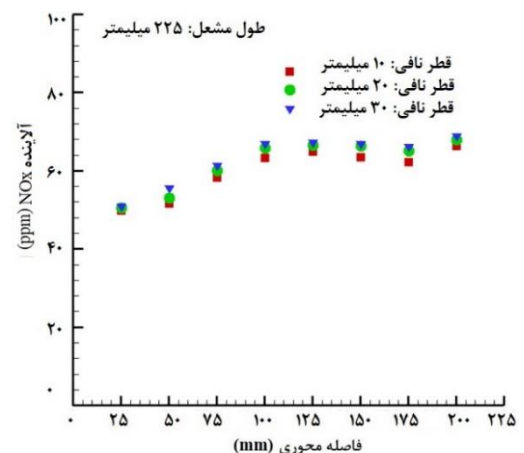
طول محفظه اختلاط (mm)	دمای میانگین (k)	سرعت میانگین (m/s)	فشار میانگین (pa)
۲۲۵	۱۵۸۳/۲۲	۵۵/۳۲	۳۱۶/۱۲
۲۵۰	۱۵۷۹/۷۱	۴۹/۱۷	۲۸۵/۰۸
۳۰۰	۱۶۶۵/۱۳	۴۳/۸۶	۲۶۴/۱۹



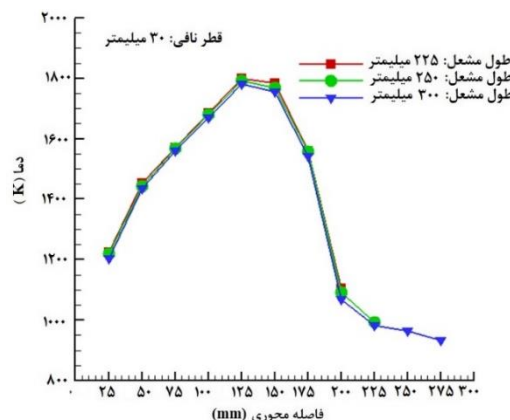
شکل ۷) توزیع دما در طول محفظه اختلاط با طول ۲۲۵ میلی‌متر در سه قطر مختلف.



شکل ۹) توزیع اکسیدهای نیتروژن در طول محفظه اختلاط با قطر نافی ۳۰ میلی‌متر در سه طول اختلاط مختلف.



شکل ۸) توزیع اکسیدهای نیتروژن در طول محفظه اختلاط با طول ۲۲۵ میلی‌متر در سه قطر مختلف.



شکل ۱۰) توزیع دما در طول محفظه اختلاط با قطر نافی ۳۰ میلی‌متر در سه طول اختلاط مختلف.

جدول ۷) میزان گرمای تولیدی در محفظه برای سه طول مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود با افزایش طول، میزان گرمای تولیدی کاهش پیدا می‌کند که این کاهش بسیار ناچیز می‌باشد. لذا با توجه به پایداری مطلوب تر آلاینده‌ها بعلت فضای بیشتر و واکنش کاملتر و طبیعتاً خروجی آلاینده کمتر، طول ۳۰۰ میلی‌متر برای این طراحی انتخاب شده است.

در جدول ۵ نیز میان گرمای تولیدی در مشعل برای سه قطر مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش قطر نافی میزان گرمای تولیدی افزایش می‌یابد.

۳-۴- اثر طول محفظه اختلاط بر پارامترهای سیالاتی و حرارتی

با توجه به نتایج قسمت قبل که قطر ۳۰ میلی‌متر به عنوان قطر مناسب انتخاب شد، در این قسمت به بررسی اثر طول محفظه اختلاط در سه طول ۲۲۵، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر با قطر نافی ۳۰ میلی‌متر ثابت پرداخته می‌شود. در جدول ۶ میزان دما فشار و سرعت میانگین داخل محفظه اختلاط برای سه طول مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش طول محفظه تفاوت چندان در دمای میانگین و سرعت میانگین دیده نمی‌شود، اما میانگین فشار کاهش چشمگیری داشته که مطلوب تر می‌باشد.

همچنین همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش طول، توزیع NOx به پایداری مطلوب تری می‌رسد. در شکل ۱۰ نیز نمودار توزیع دما در محفظه رسم شده است و همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش طول محفظه اختلاط تغییر چندان در دمای داخل آن دیده نمی‌شود.

سهم نویسندگان: نویسنده اول (محمد حاتمی) بعنوان استاد راهنمای پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده دوم (علی قلی‌پور) فعالیت داشته و هر دو نویسنده در مدلسازی، داده های آزمایشگاهی و تحلیل نتایج مشارکت داشته اند و سهم امتیازی مطابق با آیین نامه های موجود خواهد بود.

حمایت های مالی: هزینه های این مقاله از محل گرنت عضو هیات علمی مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین تامین شده است.

منابع

- 1- Energy Balance Sheet 2007, Deputy of Electricity and Energy Affairs, Electricity and Energy Macro Planning Office, Ministry of Energy, Iran 2008. [Persian]
- 2- Gil AV, Zavorin AS, Starchenko AV. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners. Energy. 2019;186:115844.
- 3- Kumar RS, Gowtham S, Kamali B, Asokan M, Sai PR, Xavier DD, Seralathan S, Hariram V. Design and analysis of moderate or intense low-oxygen dilute combustion burner. Materials Today: Proceedings. 2020.
- 4- Xie Y, Tu Y, Jin H, Luan C, Wang Z, Liu H. Numerical study on a novel burner designed to improve MILD combustion behaviors at the oxygen enriched condition. Applied Thermal Engineering. 2019;152:686-96.
- 5- Anufriev IS, Kopyev EP, Sadkin IS, Mukhina MA. Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NOX emission. Fuel.;290:120100.
- 6- Mayrhofer M, Koller M, Seemann P, Prieler R, Hochenauer C. Evaluation of flamelet-based combustion models for the use in a flameless burner under different operating conditions. Applied Thermal Engineering. 2020;183:116190.
- 7- Maznoy A, Pichugin N, Yakovlev I, Fursenko R, Petrov D, Shy SS. Fuel interchangeability for lean premixed combustion in cylindrical radiant burner operated in the internal combustion mode. Applied Thermal Engineering. 2021;186:115997.
- 8- Zhang F, Heidarifatasm H, Harth S, Zirwes T, Wang R, Fedoryk M, Sebbar N, Habisreuther P, Trimis D, Bockhorn H. Numerical evaluation of a novel double-concentric swirl burner for sulfur combustion. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020;133:110257.
- 9- Garcia AM, Rendon MA, Amell AA. Combustion model evaluation in a CFD simulation of a radiant-tube burner. Fuel. 2020;276:118013.
- 10- Bubnovich V, Hernandez H, Toledo M, Flores C. Experimental investigation of flame stability in the premixed propane-air combustion in two-section porous media burner. Fuel. 2021 May 1;291:120117.
- 11- Chen X, Li J, Zhao D, Rashid MT, Zhou X, Wang N. Effects of porous media on partially premixed combustion and heat transfer in meso-scale burners fuelled with ethanol. Energy. 2021 Feb 22:120191.

جدول ۷) اثر طول محفظه اختلاط بر میزان گرمای تولیدی در قطر نافی ۳۰ میلی‌متر

طول (mm)	Q(I/S)
۲۲۵	۱۷۴۲۳/۱۸
۲۵۰	۱۷۳۳۶/۴۴
۳۰۰	۱۷۳۱۹/۰۲

برای حالت بهینه ۳۰-۳۰۰ میلی‌متر کانتور های دما، فشار، سرعت و آلاینده ها آمده است که نشان می‌دهد دمای بیشینه از همه حالات کمتر بوده اما دمای میانگین در داخل محفظه اختلاط به مقدار کمی افزایش می‌یابد. همچنین خروجی آلاینده ها نسبت به دیگر نمونه های مورد بررسی کمتر گزارش شده است. بیشینه کسر حجمی CO2 در خروجی مشعل ۰/۱۳۵ و بیشینه کسر حجمی CH4 در خروجی ۰/۵۵ می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر قطر نافی و طول اختلاط در مشعل کوره پیش گرم مجتمع صنعتی فولاد اسفراین بر پارامتر های سیالاتی و حرارتی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. سه قطر مختلف (۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر) برای نافی و سه طول مختلف (۲۲۵، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر) برای طول اختلاط در نظر گرفته شد که نتایج نشان می‌دهد با افزایش قطر نافی میزان دما و فشار محفظه افزایش یافته و علت این امر را می‌توان افزایش دبی حجمی و افزایش واکنش احتراقی بین هوا و سوخت با افزایش قطر نافی دانست که باعث افزایش میزان دمای محفظه احتراق می‌شود. همچنین با افزایش قطر نافی و در پی آن افزایش دبی حجمی و بهبود فرآیند احتراق، میزان آلاینده های نیتروژن (NOx) افزایش پیدا می‌کند، اما درصد افزایش آن در مقایسه با افزایش میزان دما و حرارت تولیدی ناچیز است، در نتیجه از بین قطرهای انتخابی قطر ۳۰ میلی‌متر به عنوان قطر مناسب برای نافی مشعل انتخاب شده است. همچنین با بررسی اثر طول محفظه اختلاط مشاهده شد که با افزایش طول محفظه تفاوت چندانی در دما و سرعت میانگین دیده نمی‌شود، اما میانگین فشار کاهش چشمگیری داشته که مطلوب تر می‌باشد. همچنین با افزایش طول، توزیع آلاینده اکسیدهای نیتروژن به پایداری مطلوب تری می‌رسد که طول ۳۰۰ میلی‌متر به عنوان طول اختلاط پیشنهادی ارائه شده است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از حمایت و همکاری مسئولان مجتمع صنعتی فولاد اسفراین که امکان حضور، داده برداری و مشاهدات جهت تحلیل نتایج را فراهم ساختند، تشکر و قدردانی می‌نمایند. همچنین از داوران محترم که با نظرات خود موجب بهبود کیفیت مقاله شدند سپاسگزاری می‌نمایند.

تعارض منافع: هیچگونه تعارض منافعی در این مقاله پژوهشی وجود ندارد.

- 12- Markan A, Baum HR, Sunderland PB, Quintiere JG, de Ris JL. Transient ellipsoidal combustion model for a porous burner in microgravity. *Combustion and Flame*. 2020;212:93-106.
- 13- He J, Chen Z, Jiang X, Leng C. Combustion characteristics of blast furnace gas in porous media burner. *Applied Thermal Engineering*. 2019;160:113970..
- 14- Aghajani HA, Safaei B, Basooli A. Identification and Prioritization of Energy Consumption Strategies in Industry Using Multi-Criteria Decision Making Techniques (Case Study of Iranian Alloy Steel). *Journal of Operational Research in Its Applications*. 2013 Aug 1; 2: 5-13. [Persian]
- 15- Rasooli M. Investigation of performance and optimization of thermal efficiency of a gas furnace by experimental method and its simulation using FIHR software. Master thesis, USB University, 2010; 5-25. [Persian]
- 16- Khakpour A, Momeni A. Investigation of new methods to reduce heat loss and optimize energy consumption in furnaces. First national conference on burner and industrial furnaces. 2011; Tehran, Iran. [Persian]
- 17- Koveity A. Investigating the effect of recuperator on increasing efficiency and recycling heat losses of Mobarakeh Steel hot rolled preheating furnaces. First national conference on burner and industrial furnaces. 2011; Tehran, Iran. [Persian]
- 18- Sharif H, Tavakoli A, Sadri MA. Investigating energy saving opportunities in preheated furnaces of steel mills with the help of PHAST software. First national conference on heat and mass transfer. 2012, USB university, Zahedan, Iran. [Persian]
- 19- Khoshmanesh K, Kouzani AZ, Nahavandi S, Abbassi A. Reduction of fuel consumption in an industrial glass melting furnace. IEEEXplore Conference. TENCON 2007. [Persian].
- 20- Rezazadeh N, Hosseinzadeh H, Wu B. Effect of burners configuration on performance of heat treatment furnaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;136:799-807.
- 21- Hatami M, Qavami H, Ghorbanian A. Investigation of AHP-JoHarry models for increasing the relation between Esfarayen Industries and Universities. Research Plan. 2020, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran. [Persian]