

مطالعه تجربی و شبیه‌سازی سه‌بعدی کوره دوار ریخته‌گری چدن با یک مشعل گازسوز

بهزاد بایراملو^۱، سید محمد میرنجفی زاده^۲ و رحمت ستوده قره باغ^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران، behzad.bt70@gmail.com

۲- دکتری، مهندسی شیمی، شرکت گاز استان تهران، mirnajafi@gmail.com

۳- استاد، مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران، sotudeh@ut.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۵، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۰/۰۱/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸)

چکیده: در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی یک کوره دوار ریخته‌گری گازسوز ۳۵۰ کیلوگرمی چدن و بهینه‌سازی مصرف سوخت آن به روش دینامیک سیالات محاسباتی بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی، این کوره به سه ناحیه مجزا تقسیم می‌شود: الف) ناحیه بار جامد با فاز مایع-جامد، ب) ناحیه احتراقی با فاز گازی و ج) ناحیه جامد دوار یا دیواره نسوز کوره. این سه ناحیه به صورت سه‌بعدی و گذرا، با لحاظ برهمکنش‌های بین فصول مشترک نواحی فوق، شبیه‌سازی شده‌اند. در هر ناحیه، شبیه‌سازی بر مبنای حل هم‌زمان معادلات هیدرودینامیکی، از جمله اتلاف گردابه و معادلات مربوط به واکنش‌های شیمیایی، صورت می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی دمای جداره بیرونی بدنه کوره با داده‌های صنعتی مطابقت دارد که اعتبار مدل عددی را اثبات می‌کنند. در این شبیه‌سازی، نرخ ذوب‌دهی، تولید آلاینده‌های CO و NOx و مصرف ویژه سوخت، سرعت دورانی، پیش‌گرمایش هوای احتراق، تغییر درصد هوا و تولید آلاینده‌ها نیز بررسی شد. تغییر پیکره‌بندی کوره دوار موجب کاهش ۵٪ مصرف سوخت می‌شود که از نظر بهینه‌سازی مصرف سوخت و کیفیت آلیاژ تولیدی در این کوره حائز اهمیت است.

کلید واژگان: کوره دوار، گاز طبیعی، دینامیک سیالات محاسباتی، احتراق، ذوب

مقدمه

کوره‌های دوار در صنایع ریخته‌گری از جمله مصرف‌کنندگان عمده انرژی و مولدهای عمده آلاینده‌های صنعتی‌اند. به بازیافت قراضه‌های فلزی صنعت فلز ثانویه گفته می‌شود که با خوراک درون کوره، ذوب و باهم ترکیب می‌شوند تا به آلیاژ مورد نظر برسند. دستگاه اصلی در صنایع ریخته‌گری کوره دوار است که حدود ۷۵٪ انرژی صنعت ریخته‌گری در این دستگاه مصرف می‌شود. خوراک واحدهای ریخته‌گری چدن، قراضه چدنی، شمش آهن چدنی، کک متالورژیکی و سایر آلیاژهای آهنی است. تولید جهانی آلیاژهای آهنی پیوسته در حال افزایش است، به طوری که از سال ۲۰۰۵ تا کنون با ۴۰٪ رشد به بیش از ۲ میلیارد تن رسیده است. برای تولید آلیاژهای آهنی، بازیافت قراضه در مقایسه با استخراج سنگ آهن دارای برتری‌های زیادی از جمله مصرف انرژی تا ۷۰٪ کمتر و هزینه کمتر است. به علاوه، استخراج سنگ آهن مشکلات زیست‌محیطی زیادی دارد که صنعت فلز ثانویه از آن‌ها مستثنی است [۱].

طی بررسی‌ها و بازدیدهای میدانی، که تحت حمایت شرکت گاز استان تهران از کارگاه‌های ریخته‌گری استان انجام شد، مشکلات عمده این صنایع مواردی چون تامین مواد اولیه (کیفیت خوراک از جمله محتوای فسفر و گوگرد آن)، تامین انرژی پاک در دسترس، ایمنی کار، آلاینده‌گی بالا و مشکلات زیست‌محیطی و عدم به‌روزرسانی تکنولوژی است که مانع بهره‌وری مناسب آن‌ها و رقابت با صنایع بزرگ است. مهم‌ترین دغدغه صنعت تولید فلز ثانویه در کشور آلاینده‌گی بالا و تکنولوژی قدیمی

(به‌خصوص مشعل‌های سنتی که کیفیت احتراق نامناسبی دارند) است که در سال‌های اخیر با استفاده از گاز طبیعی ارزان‌قیمت تا حدود زیادی از حجم آلاینده‌های سوخت مایع و هزینه بالای راهبری کوره‌ها کاسته شده است [۲]. البته، ارتقای تکنولوژی با مشعل‌های گازسوز بیش از چند دهه است که در صنایع ریخته‌گری دنیا رواج پیدا کرده است، اما به‌تازگی مورد توجه صنعتگران داخلی قرار گرفته است [۳-۵]. طبق گزارش شرکت گاز استان تهران، از میان انواع کوره‌ها، کوره دوار، به‌دلیل انعطاف، توان عملیاتی بالا و یکنواختی آلیاژ طی دوران، در صنعت بازیافت آهن از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده [۶] و دستگاه اصلی کارخانه‌های ریخته‌گری ثانویه است [۷-۹].

در مقایسه با کوره‌های دوار مایع‌سوز سنتی، کوره‌های دوار با مشعل مناسب گازسوز دارای کیفیت مذاب خوب، زمان ذوب‌دهی کوتاه‌تر و طول عمر بیشتر کوره به‌دلیل حذف ترکیبات گوگردی، دوده و خاکستر بوده (کاهش هزینه تعمیرات و نگهداری) و به‌دلیل سرعت زیاد سیال میزان تولید سرباره^۱ در آن‌ها کاهش می‌یابد [۱۰]. همچنین، در شعله‌های اکسیدی با توجه به مصرف هوای اضافی کم آن‌ها، که زیر ۲۰٪ است، دمای شعله نیز بالا نگه داشته می‌شود، هرچند که سبب اتلاف آلیاژی بیشتری نسبت به شعله احیایی می‌شود [۱۱، ۱۲]. البته، تشخیص استفاده از شعله اکسیدی یا احیایی به تشخیص فرایند است و هرکدام مزایا و معایبی دارند. لذا، گازرسانی به این واحدها و به‌کارگیری مشعل مناسب گازسوز موجب عدم نیاز به مکانیزم‌های خاص سوخت‌رسانی و تجهیزات اضافی ذخیره‌سازی، حذف بخارات سمی سوخت مایع و در نتیجه تامین ایمنی مناسب کار پرسنل نیز می‌شود. در یک کوره دوار، سوخت و هوا وارد مشعل شده و حرارت شعله و گازهای احتراق توسط مشعل به جداره نسوز داخلی کوره و بار جامد فلزی منتقل می‌شود که موجب افزایش دما و ذوب بار می‌شود (شکل ۱). بازدیدهای میدانی از صنعت نشان می‌دهد که مصرف انرژی بالای این کوره‌ها ناشی از ۱- پیکربندی و طراحی‌های متنوع، ۲- عدم استفاده از مواد نسوز مناسب، ۳- عایق نامناسب، ۴- نقص مشعل‌های احتراق، ۵- تجهیزات ضعیف کنترل دما یا نبود این تجهیزات و ۶- تعمیر و نگهداری ضعیف است. بهینه‌سازی می‌تواند بازده کوره را تا بیش از ۲۵٪ بالا ببرد و به‌علاوه سبب افزایش بازده انرژی، حداقل شدن زمان‌های توقف، کاهش اتلاف سیلیسیم و منگنز، افزایش دمای بارریزی فلز، کاهش نیاز نمونه‌گیری، افزایش عمر کوره، کاهش مصرف کک، بهبود انتقال جرم، حرارت، جریان سیال و کنترل‌پذیری متالورژیک شود [۱۳]. شکل ۱، طرح کوره دوار با پیش‌گرم‌کن^۲ و نواحی مختلف کوره در برش عرضی کوره را نشان می‌دهد.

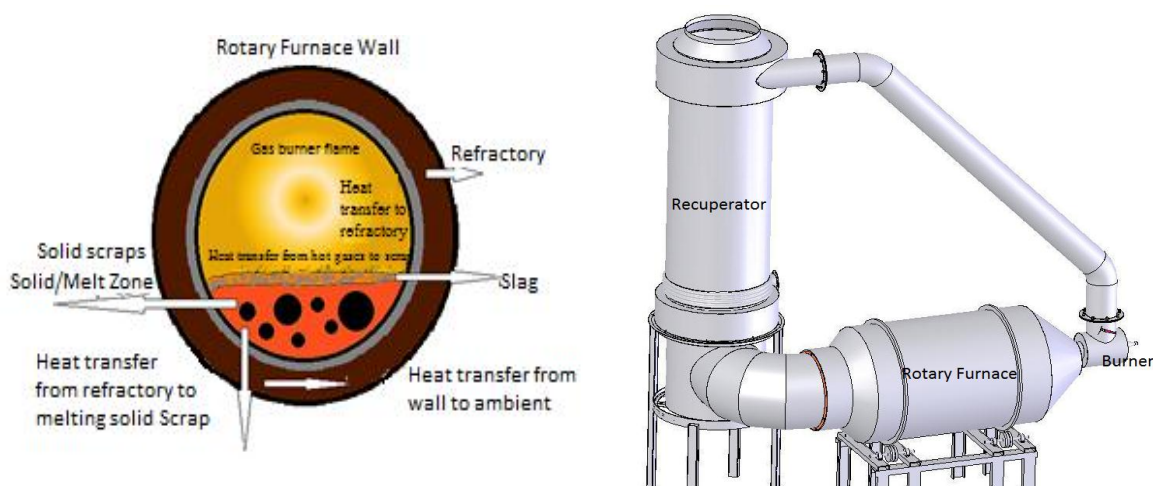


Figure 1- Schematic of a Rotary furnace with recuperator (2-pass heat exchanger) and various zones of the furnace

شکل ۱- طرح کوره دوار دارای پیش‌گرم‌کن (مبدل حرارتی دوگذر) و نواحی مختلف کوره در برش عرضی کوره

1. Slag
2. Recuperator

از طرفی، توزیع دما و غلظت گونه‌های کوره مسائل مهمی‌اند که مستقیماً با مصرف سوخت، انتشار آلاینده‌ها، عملکرد و طول عمر کوره (ناشی از خوردگی و خستگی حرارتی) مرتبط‌اند. البته، گازسوز شدن این کوره‌ها و استفاده از پیش‌گرم‌کن (شکل ۱) تا حدودی از این مشکلات می‌کاهد. توزیع دمای کوره به دینامیک سیالات، احتراق و انتقال حرارت داخل کوره بستگی دارد و تعیین قابل اطمینان آن برای پیش‌بینی عملکرد کوره ضروری است. با توجه به شرایط عملیاتی کوره، CFD رویکرد مناسبی برای درک و مطالعه فرایندهای پیچیده درون کوره دوار است. فرایندهایی چون احتراق آشفته و مکانیزم‌های سه‌گانه انتقال حرارت، ذوب بار فلزی با ترکیب‌های شیمیایی مختلف و دوران کوره (شکل ۱). در مدل‌سازی احتراق، شیمی و انتقال حرارت تشعشعی بیشترین تأثیر را در حل معادلات دارند [۱۴-۱۶]. لذا، در این پژوهش سعی شده است، ضمن بهبود مدل‌سازی احتراق، مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها بهینه شوند.

در مدل‌سازی‌های قبلی، از مدل‌های مختلفی، نظیر مدل‌های احتراقی EDC^۱ و TPDF^۲، مدل‌های اغتشاشی RNG-e^۳، Realizable k-e و RSM^۴، مدل تابش گازها بر اساس نظریه رایلی-می^۵، انتقال گسسته^۶، P1، مونت کارلو و غیره، برای ارزیابی عملکرد کوره‌های ذوب فلزات استفاده شده است. بورجیس و همکاران در پژوهشی کوره ساکن ۷۲ تنی ذوب آلومینیوم با سوخت گاز را با ترکیب مدل حجم محدود جریان سیال و مدل ناحیه‌ای^۷ شبیه‌سازی کرده و از مدل اغتشاشی k-ε برای توصیف جریان، برای تشعشع، از مدل ناحیه‌ای و برای احتراق، از مدل ساده‌شده شعله استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش اثر نامطلوب نفوذ هوای اطراف را بر کارایی کوره نشان داد [۱۷]. در تحقیق دیگری، هوگن دورن و همکارانش مدل اغتشاشی k-ε، مدل احتراق تعادلی و مدل تشعشعی انتقال گسسته را به‌منظور بررسی عددی عملکرد کوره ساکن ذوب شیشه به‌کار گرفتند [۱۸]. محفظه احتراق کوره ساکن ذوب آلومینیوم سوخت مایع با استفاده از مدل اغتشاشی k-ε، مدل احتراقی اتلاف گردابه^۸ و مدل تشعشعی انتقال گسسته در مطالعه توسط نیکله و همکارانش شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که تولید دوده به افزایش میزان تشعشع در داخل کوره و کاهش دمای شعله منجر شده و اسپری قطرات با اندازه بزرگ‌تر سوخت بازده کوره را کاهش می‌دهد [۱۹].

چین و همکارانش ضمن ارائه مروری بر مصرف انرژی در صنایع ریخته‌گری، بر نیاز به کوره کارآمد از لحاظ مصرف بهینه انرژی تأکید کردند. آن‌ها به‌صورت تجربی سرعت دورانی بهینه کوره دوار به ظرفیت ۲۰۰ kg با سوخت دیزل را گزارش دادند و همچنین به‌کمک شبکه هوشمند عصبی^۹ و با در نظر گرفتن تولید حداقل آلاینده‌ها، به‌کمک پیش‌گرمایش هوا و استفاده از مشعل اکسند سوخت^{۱۰}، مقدار بهینه پیش‌گرمایش هوا را ۳۰۰ °C و مقدار بهینه هوای اضافی را برای مصرف انرژی کمینه، ۱۷٪ هوای نظری به‌دست آوردند [۲۰-۲۲]. بت آزمون‌هایی شامل کاهش هوای اضافی، کاهش نرخ جریان سوخت و تغییر مشعل را به‌منظور مطالعه بازده انرژی در کوره‌های ذوب و نگهدارنده آلومینیوم انجام داد. نتیجه کار وی شامل ۲۶٪ افزایش بازده انرژی مصرف گاز طبیعی و نیز کاهش چشمگیر میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و دیگر آلاینده‌ها بود [۲۳]. در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه احتراق سوخت گازی نیروگاه‌ها انجام شده است. از این جمله پریلر و همکاران به تحلیل CFD کوره ۱۱/۵ kW با احتراق اکسیژن و گاز در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند که مدل فلیملت پایا و گذرا^{۱۱} با سه مدل سینتیک

1. Eddy Dissipation Concept
2. Transported Probability Density Function
3. Renormalization group
4. Reynolds stress equation model
5. Rayleigh and Mie-theory
6. Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)
7. Zone Model
8. Eddy Dissipation Model (EDM)
9. ANN: Artificial Neural Network
10. Oxy-fuel burners
11. Steady laminar flamelet model

شیمیایی مختلف در محیط احتراق سوخت گازی مورد مطالعه قرار گرفت. مکانیسم skeletal25 قادر به پیش‌بینی دمای شعله و غلظت گونه‌ها مطابق با مدل EDC بود. نتایج SFM^۱ با دمای اندازه‌گیری شده در کوره تطابق بسیار خوبی نشان داد [۲۴].

فضل‌الهی قمشی و مردانی تزریق جریان هوا به محفظه احتراق توربین گازی^۲ را در حالت پایا و با فرض تقارن محوری شبیه‌سازی کردند. آن‌ها، همچنین، مدل‌های اغتشاشی RNG-e، Realizable k-e و RSM در پیش‌بینی الگوی جریان غیراحتراقی درون محفظه را بررسی و پس از انتخاب مدل اغتشاشی مناسب، جریان احتراقی را با به‌کارگیری مدل‌های EDC و TPDF، در کنار استفاده از سینتیک شیمیایی DRM22^۳، شبیه‌سازی کردند [۲۵]. دما، ترکیب گاز و غلظت ذرات، شدت تابش و شار گرمای تابشی برای ترکیبات سوختی مختلف در انتقال حرارت تشعشعی در کوره ۵۸۰ kWh تولید گندله سنگ آهن^۴، توسط گونارسن و همکارانش مورد مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی قرار گرفت. در این مطالعه، تشعشع گازها با استفاده از مدل استاتیکی باند باریک^۵ و دوده و ذرات سوخت با استفاده از نظریه رایلی-می مدل شدند. بنابر این نتایج، از این مدل‌ها می‌توان در کوره‌های صنعتی استفاده کرد [۲۶]. طی تحقیقی، الاتار و همکاران از CFD برای بررسی شعله‌های مشعل در دهانه کوره‌های دوار، که بر رفتار شعله تاثیر می‌گذارد، مدل محوری دوبعدی پیش‌بینی شد. در این مطالعه، سوخت گاز زیستی با ترکیب متان و مونوکسید کربن (۵۰٪ CH₄ و ۵۰٪ CO₂) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی این تحقیق با داده‌های تجربی و نتایج دیگر محقق‌ها مطابقت داده شد [۲۷].

توزیع یکنواخت دما باعث افزایش عمر کوره شده و منجر به گرم‌شدن یکنواخت بار می‌شود. گردش بخشی از گازهای احتراقی درون کوره سبب رقیق‌سازی فرایند احتراق می‌شود. این رقت باعث کاهش دمای شعله در مجاورت دیواره و افزایش همگنی در سطح کوره شده و در عین حال انتشار NOx را نیز کاهش می‌دهد؛ چیزی که با طراحی صحیح پیکره‌بندی و استفاده از مشعل مناسب حاصل می‌شود. مدل‌سازی احتراق بخشی اساسی در شبیه‌سازی CFD سیستم‌های حرارتی است. مناسب‌ترین مدل، از نظر دقت و هزینه محاسباتی، به ویژگی‌های سیستم بستگی دارد. طبق مطالعات پیشین، مدل EDC با مکانیزم شیمی دقیق می‌تواند ویژگی‌های احتراق و انتشار NOx را به‌خوبی پیش‌بینی کند [۲۸-۳۱]. کار حاضر شبیه‌سازی CFD کوره دوار را ارائه می‌دهد. مدل ارائه‌شده در این پژوهش با تغییر و اصلاح جزئی پارامترهای کوره مورد نظر، از جمله خواص فیزیکی قراضه‌ها، در تمامی کوره‌های دوار ریخته‌گری (هر نوع فلز و با هر ابعادی از کوره) قابل استفاده است.

آزمایش‌های تجربی

برای به‌دست‌آوردن اطلاعات تجربی این پژوهش، چندین عملیات ذوب در کارگاه ریخته‌گری خواجوند و با حمایت اداره پژوهش و فناوری شرکت گاز استان تهران انجام شد. همچنین، از داده‌های شرکت شعله صنعت نیز بهره‌برداری شده است. شکل ۲ طرح آزمایشگاهی کوره دوار مورد مطالعه را نشان می‌دهد. کوره فوق دارای سه ناحیه اصلی است: ناحیه گازهای احتراقی، ناحیه ذوب و ناحیه دیواره کوره. برای بازیافت حرارت خروجی کوره از پیش‌گرم‌کن (مبدل حرارتی پوسته و لوله) جریان متقابل استفاده شده است. ذوب‌ها در کوره دوار ریخته‌گری ۳۰۰ کیلوگرمی صورت گرفت. کوره قبل از شروع ذوب پیش‌گرم شده و در تهیه ذوب از ۱۲۰ kg آهن چدنی رده ریخته‌گری، ۲۰۰ kg قراضه چدن و ۲۵ kg فولاد خفیف استفاده شد (جدول ۱). فرومگنز و فروسیلیسیم در حدود ۱ kg به بار افزوده شد. برای تنظیم کربن از کک کلسینه نفتی ۹۹٪ (حاوی ۰/۰۳٪ گوگرد) و برای گوگردزدایی مذاب در پایان ذوب از کربنات سدیم استفاده شد.

1. Steady flamelet model
2. GTMC
3. Detailed Reaction Mechanism from GRI reduced to 22 sets.
4. Iron ore pellets
5. Statistical Narrow Band model

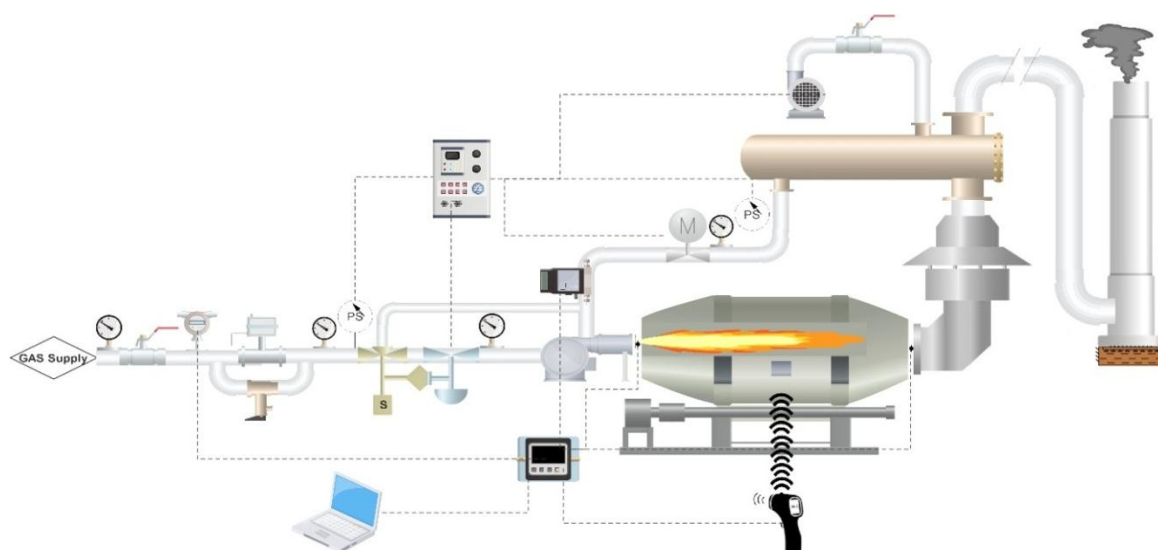


Figure 2- Schematic of the experimental setup

شکل ۲- طرح کار آزمایشگاهی حاضر

جدول ۱- ترکیب شیمیایی اجزاء اصلی در ناحیه جامد/مذاب

Table 1- The chemical composition of the main components in the solid / molten region

	C%	Si%	Mn%	P%	S%
Cast iron scrap	3.057	2.152	0.653	0.171	0.115
Raw cast iron	3.932	2.133	0.854	0.048	0.113
Mild steel	0.153	0.253	0.834	0.016	0.023
product	3.277	2.512	0.743	0.115	0.075

برای اندازه‌گیری دمای مذاب از ترموکوپل دستی استفاده و دمای مذاب حداکثر تا 1500°C بالا برده شد (شکل ۳). بعد از تهیه مذاب در کوره، مذاب‌ها درون پاتیل پیش‌گرم‌شده‌ای منتقل و بعد از بارگیری و ثبت دما عملیات ریخته‌گری در 1450°C انجام شد. در نهایت، فروسیلیس منیزیم به مذاب اضافه شد. دمای گاز خروجی کوره و خروجی مشعل با استفاده از ترموکوپل (نوع R از جنس Pt-Rh) در حین ذوب ثبت شد تا با شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گیرد. مشعل انتخاب شده برای آزمایش، مشعل $1/400\text{ MCal/hr}$ است و در شکل ۲ تجهیزات مورد استفاده آن مشاهده می‌شود. این مشعل از نوع نازل-مخلوط بوده و با بسیاری از مشعل‌های موجود در مطالعات منابع متفاوت است^۱.

در این نوع مشعل دو ورودی هوا یکی ثابت و دیگری متغیر با فرمان‌گیری از محرک وجود دارد. آنالیز گاز مصرفی در جدول ۲ مشاهده می‌شود. کوره دوار مورد نظر در فاصله‌ای برابر 3 cm از مشعل قرار دارد. از نظر هندسی (شکل ۳) این کوره از استوانه‌ای به قطر خارجی 720 mm و قطر داخلی 440 mm به علاوه دو مخروط ناقص مربوط به مجراهای ورودی و آگزوز ناحیه احتراق تشکیل شده است. قطر کوچک‌تر داخلی مخروط ناقص ورودی 120 mm و زاویه آن 20° است. مخروط ناقص آگزوز نیز قطر داخلی برابر 340 mm دارد. بدنه نسوز کوره دوار از ۳ لایه شامل جداره فولادی خارجی، آجر نسوز و خاک نسوز تشکیل شده که ضخامت هر یک از این لایه‌ها به ترتیب برابر 9 mm ، 63 mm و 68 mm است. طول کوره دوار 2100 mm است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوخت و هوا

Table 2- Chemical composition of fuel and air

Species	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O
Natural Gas	88	3.5	1.5	0.5	0.2	0.1	5.7	0	0.5	0
Air	0	0	0	0	0	0	0.78	0.21	0.0003	0.014

۱. مشعل گازسوز OPG 1400 شرکت شعله صنعت که از شرایط احتراق احيائي تا اکسیدي با درصدهاي مختلف هوای اضافي قادر به عملکرد است.

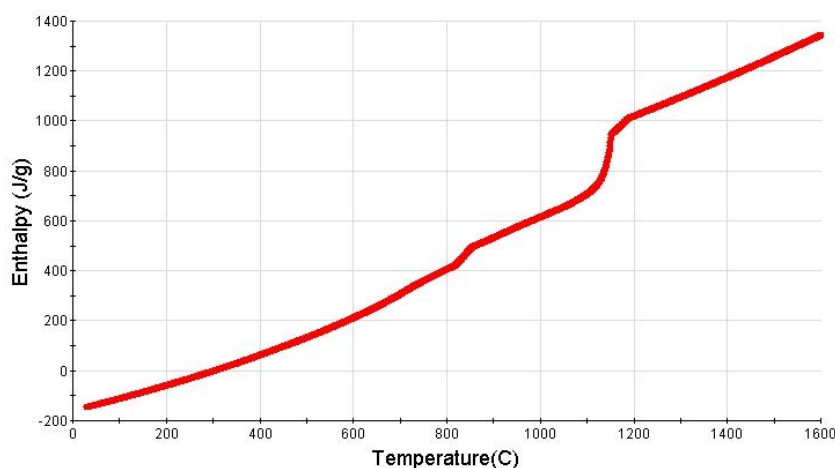


Figure 3- Enthalpy changes of cast iron as a function of temperature (Jmatpro software)

شکل ۳- تغییرات آنتالپی چدن بر حسب دما (نرم‌افزار Jmatpro)

مدل‌سازی عددی

کوره دوار به سه ناحیه جامد/مذاب، احتراق و دیواره نسوز با مرزهای مشترک (مذاب-دیواره، احتراق-دیواره و ذوب-احتراق) تقسیم شده و مدل از ناحیه گازی با جریان آشفته شامل احتراق و انتقال حرارت تشعشعی در قسمت بالایی کوره، ناحیه جامد لایه نسوز و دیواره و ناحیه جامد-مایع مربوط به مذاب-قراضه در قسمت پایینی کوره تشکیل شده است. گاز طبیعی مصرفی مطابق جدول ۲ و برطبق آن ارزش حرارتی بالایی سوخت برابر $38/08 \text{ MJ/m}^3$ معادل $49/44 \text{ MJ/kg}$ ($807/935 \text{ kJ/gmol}$) است. نسبت مولی هوا به سوخت استوکیومتری $9/57$ و با فرض 10% هوای اضافه برای محاسبه اولیه برابر $10/53$ ($16/77$ جرمی) است. نسبت هم‌ارزی برای شعله اکسیدی $1/10$ (مقدار اکسیژن اضافی در گازهای خشک احتراقی $2/1$) و برای شعله احیائی $0/9$ (احتراق ناقص) است. همچنین، دمای شعله بی‌دررو سوخت مورد نظر، با اعمال 200°C پیش‌گرمایش، 2026°C است. شرایط جوی محل عبارت‌اند از: فشار $88/5 \text{ kpa}$ و متوسط دمای 300 K . حل عددی به‌روش حجم محدود و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT R19.0 انجام شد. گازها سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر در حالت ناپایا فرض و با دینامیک سیالاتی معادلات RANS^۱ مدل شدند.

تنسور تنش رینولدز در معادلات RANS^۲ با استفاده از زیرمدل SST k- ω ^۳ محاسبه شد. این زیرمدل، به‌دلیل عملکرد برتر آن در این نوع سیستم‌ها، تقریباً در تمام شبیه‌سازی کوره‌های موجود در منابع با نتایج خوبی به‌کار رفته است [۳۲-۳۶]. برای حل معادله انتقال حرارت تشعشعی از مدل جهت‌های تفکیک‌شده^۴ استفاده شد. ضریب جذب گاز، با استفاده از مدل مجموع وزنی گازهای خاکستری^۵، با ضرایب پیشنهادی اسمیت و همکاران محاسبه شد [۳۷،۳۸]. با توجه به شبیه‌سازی در فشار $88/5 \text{ kpa}$ ، قواعد محاسبه پیشنهادی ادواردز و ماتاوسیان برای تأثیر فشار بر ضرایب جذب گاز اعمال شد [۳۹]. روش تفکیک بالا برای گسسته‌سازی مکانی و روش مرتبه دو برای گسسته‌سازی زمانی و برای کوپلینگ سرعت-فشار از روش PISO^۶ استفاده شد. معیار هم‌گرایی حل عددی اختلاف کمتر از مقدار 10^{-4} مولفه‌ها و حداکثر تعداد تکرار در هر بازه زمانی ۳۰ انتخاب شد.

1. RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes
 2. Reynolds Average Navier Stokes
 3. Shear Stress Transport Model
 4. Discrete Ordinate Model
 5. WSGGM
 6. Pressure-Implicit with Splitting of Operators

بار جامد و مذاب

در جدول ۲، ترکیب شیمیایی آلیاژهای آهنی مشخص است. با داشتن ترکیب شیمیایی بار جامد به کمک نرم افزار پرکاربرد مدل سازی ترمودینامیکی آلیاژهای فلزی Jmatpro خواص ترموفیزیکی متغیر بار جامد با دما وارد مدل سازی شد. شکل ۳ نمودار تغییرات آنتالپی بار جامد با افزایش دما را نشان می دهد. مطابق شکل ۳ هر کیلوگرم از بار جامد برای اینکه از دمای محیط به دمای °C ۱۵۰۰ برسد به حدود ۱/۵ Mj حرارت نیاز دارد. برای مدل سازی ذوب و رفتار ناحیه قراضه/مذاب، که سیالی دوفازی مایع-جامد است، از روش آنتالپی تخلخل استفاده می شود. روش آنتالپی-تخلخل با کاهش هزینه محاسباتی جواب های دقیقی به خصوص برای مسائل تغییر فاز^۱ (ذوب) آلیاژی، که در بازه دمایی رخ می دهد، ارائه داده است [۴۰]. بیان فیزیکی مدل به این نحو است که ناحیه موسوم به خمیری مایع-جامد به عنوان محیطی متخلخل با تخلخل کسر مایع در نظر گرفته می شود و جمله چشمه تکانه برای لحاظ افت فشار حاصل از حضور مواد جامد به معادله بقای تکانه افزوده می شود (مانند معادله کوزنی کارمن در بستر سیال). معادلات این مدل به صورت (۱) تا (۷) است.

$$H=h+\Delta H \quad (1)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (2)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ 1 & T > T_1 \\ \frac{T-T_s}{T_1-T_s} & T_s < T < T_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S \quad (5)$$

$$A^* = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + q)} A_{mush} \quad (6)$$

$$S = A^* \cdot \phi \quad (7)$$

طبق رابطه (۱)، آنتالپی به صورت مجموع گرماهای محسوس و نهان ذوب محاسبه می شود که در رابطه (۲)، T_{ref} دمای مرجع، h_{ref} آنتالپی مرجع، h آنتالپی کل و $\int_{T_{ref}}^T C_p dT$ آنتالپی محسوس اند. ذوب بین دو دمای جامدشدگی T_s و مایعشدگی T_L رخ می دهد که ناحیه خمیری است و مخلوطی از فازهای جامد و مایع است (شکل ۳) [۴۰]. β کسر مایع موضعی و S جمله چشمه است. A^* عبارتی است که به صورت معادله کوزنی-کارمن^۲ تعریف شده و با افزایش کسر مایع از صفر تا یک، از صفر تا مقادیر زیاد افزایش می یابد. A_{mush} ثابت ناحیه خمیری است و به مورفولوژی ناحیه بستگی دارد و مقادیر بین 10^4 و 10^7 برای اکثر محاسبات توصیه شده است. q عددی کوچک است (۰/۰۰۱) تا از تقسیم بر صفر جلوگیری شود. برای بیان آشفستگی در این ناحیه نیز از زیرمدل SST k- ω استفاده شده است و در معادلات تکانه و متغیرهای آشفستگی Φ (u و ω) در ناحیه خمیری با لحاظ حضور جامد جمله چشمه S (رابطه ۷) اضافه می شود.

احتراق

ورودی ناحیه احتراق دهانه مشعل است که گازهای نیمه واکنش داده مشعل از آن وارد و پس از احتراق درون محفظه کوره، محصولات احتراق از آگروز خارج می شوند. لذا، احتراق به صورت جزئی پیش آمیخته و آشفته است. بنابراین، در این ناحیه فرایندهای احتراق آشفته و تشعشع، شیمی و سینتیک واکنش باید مدل شوند. برای مدل سازی جریان مغشوش از مدل

1. Phase Change Material (PCM)
2. Kozeny-Carman

SST k- ω استفاده شده که اصلاح شده یکی از مدل‌های اغتشاشی RANS دومعادله‌ای است. زیرمدل استفاده شده احتراق EDC معادله انتقال را برای هر یک از گونه‌های درگیر در فرایند احتراق حل می‌کند. در منابع، مکانیزم‌های مختلف سینتیک دقیق و اسکلتی دیده می‌شود. مکانیزم سن دیه‌گو^۱ (با ۷۲ گونه و ۳۲۱ واکنش) [۴۱] و GRI 3/0 (با ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش) [۴۲] به‌عنوان مکانیزم‌های دقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

از طرف دیگر، DRM19^۲ (با ۱۹ گونه و ۸۴ واکنش) [۴۳] و skeletal25 (با ۱۷ گونه و ۲۵ واکنش) [۴۴] به‌عنوان مکانیزم‌های اسکلتی مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به اینکه مدل EDC با تغییر مکانیزم از دقیق به اسکلتی انحراف زیادی پیدا نمی‌کند، پس از شبیه‌سازی مشعل با مکانیزم skeletal25 و صدور نتایج خروجی آن به مدل حاضر، مجدداً از همین مکانیزم توصیف سینتیک شیمیایی احتراق داخل کوره استفاده شد. برای مطالعه ناکس، سینتیک تشکیل حرارتی آن اضافه شد [۴۵]. گرمای ویژه گاز طبق قانون اختلاط محاسبه شد. تغییرات چگالی ناشی از دما طبق قانون گاز ایدئال تراکم‌ناپذیر لحاظ شد. گرانروی و هدایت حرارتی، براساس تئوری جنبشی گازها و غلظت هر گونه در گاز، محاسبه شد. ترکیب و درجه حرارت گونه با فرض اختلاط تعادل شیمیایی برای هر بخش مخلوط محاسبه می‌شود. معادلات مدل احتراق به شکل زیر است:

$$\frac{\partial(\rho Y_I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Y_I) = \nabla \cdot (\Gamma_{I,eff} \nabla Y_I) + S_I \quad (۸)$$

$$\left[\sum_{I=A,B,C,\dots}^{N_C} v_{IJ} I \Leftrightarrow \sum_{I=A,B,C,\dots}^{N_C} v_{IJ}'' I \right] \quad (۹)$$

$$S_I = W_I \sum_{j=1}^J (v_{jI}'' - v_{jI}') R_j \quad (۱۰)$$

$$R_j = \frac{\rho(\xi^*)^2}{\tau^* [1 - (\xi^*)^3]} (Y_j^* - Y_j) \quad (۱۱)$$

$$\xi^* = C_\xi \left(\frac{v_\xi}{k} \right)^{1/4} \quad (۱۲)$$

$$\tau^* = C_\tau \left(\frac{v}{\epsilon} \right)^{1/2} \quad (۱۳)$$

که در این معادلات ξ^* نشانگر مقادیر در ریزساختارها، v گرانروی سینماتیک و C_ξ ثابت کسر حجمی است که کسر حجمی ریزساختارها به‌عنوان ξ^{*3} گونه‌ها فرض می‌شوند و در مقیاس زمانی داخل ریزساختارها واکنش می‌دهند. C_τ مقیاس زمانی معادل ۰/۴۰۸۲ است. پدیده شناوری، که در هر دو ناحیه احتراق و مذاب رخ می‌دهد، با روش بوزینسک^۳ مدل شده است. برای محاسبات پدیده شناوری، جایی که در حضور گرانش، چگالی تابعی از فشار، دما یا متغیرهای دیگری باشد، مدل شناوری کامل به‌کار گرفته می‌شود که با افزودن جمله چشمه به معادلات تکانه پیاده‌سازی می‌شود. جمله چشمه نیروی شناوری تابع تغییرات موضعی چگالی است. طی آزمایش‌ها این نتیجه حاصل شد که ۱۷٪ کربن (گرافیت) و ۱۲٪ سیلیسیم می‌سوزند و انرژی آزاد می‌کنند که این گرما به‌صورت جمله چشمه به مرز نواحی ذوب-احتراق افزوده شد. این اتلاف در حضور شعله احيائي ۱٪ است.

غلظت گونه‌های آلاینده

برای تخمین غلظت NOx نیاز به حل معادله انتقال آن یعنی معادله (۹) است. این مورد به‌صورت پس‌پردازش، یعنی پس از به‌دست‌آوردن میدان اصلی تکانه، دما و گونه‌های اصلی، حاصل می‌شود. آلاینده‌های NOx یعنی NO، N₂O و NO₂، که در گاز طبیعی NO جزء اساسی است، با سه مکانیزم NO حرارتی^۴، آنی^۵ و سوختی تولید می‌شود. مکانیزم حرارتی با اکسیداسیون

1. UC San Diego
2. Detailed Reaction Mechanism reduced to 19 sets.
3. Bousinesque Method
4. Thermal Nox
5. Prompt Nox

نیترژن هوای احتراق و به وسیله یک سری واکنش‌های شیمیایی تابع دما تشکیل می‌شود که با مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته است [۴۵]. مکانیزم آنی یا سریع در پیشانی شعله و توسط واکنش‌های سرعت بالا تولید می‌شود و توسط فنیمور شناسایی و توسعه یافت [۴۶]. تولید NO سوختی پیچیده‌تر است و به مشخصات و استوکیومتری احتراق و غلظت ترکیبات حاوی نیترژن وابسته است که در اثر تجزیه حرارتی رادیکال‌هایی مانند HCN، CN و NH تولید می‌کنند. چون گاز طبیعی حاوی هیدروکربن نیترژن‌دار^۱ نیست، از این مکانیزم صرف‌نظر می‌شود [۴۷]. مکانیزم آنی نیز در نواحی غنی از سوخت رخ می‌دهد که غنی از اتم کربن است. نشان داده شده است که در کوره‌های با دمای بالا این مکانیزم نیز از اهمیت کمی برخوردار است. لذا، در این مطالعه، مکانیزم اصلی تشکیل حرارتی NOx است که سینتیک آن در Ansys Chemkin اضافه شده است.

تشعشع

معادله انتقال مربوط به تشعشع به صورت جمله چشمه در معادله بقای انرژی ظاهر می‌شود. برای شبیه‌سازی تشعشع از DOM^۲ استفاده شده است که برای محفظه‌های احتراق استوانه‌ای مناسب بوده و با توجه به تنظیماتی که دارد می‌تواند برای تعیین دقت مورد نیاز کاربر نسبت مناسبی بین سرعت و دقت محاسبات به وجود آورد. این روش بر مبنای انفصال و تکرار RTE^۳ در زوایای فضایی جهت‌های مشخص M است. روش مجموع وزنی چند گاز خاکستری یکی از بهترین روش‌ها برای مدل کردن خصوصیات تشعشعی گاز حقیقی است [۴۸]. معادله کلی انتقال تشعشع^۴، که از آن برای به دست آوردن شدت تشعشع و سپس گرادیان شار تشعشع استفاده می‌شود، به شکل معادله (۱۴) است.

$$\frac{dI(r,s)}{ds} + (a + \sigma_s)I(r,s) = an^2 \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s') \phi(s,s') d\Omega' \quad (14)$$

که در آن r بردار موقعیت، s بردار جهت، a ضریب جذب، n ضریب شکست، σ_s ضریب پخش، σ ثابت استفان-بولتزمن، I شدت تشعشع کلی که به موقعیت r و جهت s وابسته است، T دمای محلی، ϕ تابع حالت، Ω' زاویه فضایی و $(a + \sigma_s)s$ ضخامت نوری محیط است. روش دسته‌بندی گسسته معادله تشعشع را برای تعداد محدودی از زوایای فضایی حل می‌کند. برخلاف مدل انتقال گسسته، مدل دسته بندی گسسته به صورت تعقیب پرتو عمل نمی‌کند. این مدل معادله انتقال تشعشع را به مختصات به خصوصی (x,y,z) منتقل کرده و حل می‌کند. این مدل انتقال حرارت تشعشعی سطح به سطح در مسائل احتراق و همچنین انتقال حرارت در محیط نیمه شفاف را نیز شامل می‌شود [۴۹].

شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی CFD کوره، دامنه عددی از ۱ cm بالادست ورودی شروع می‌شود که پایان دهانه مشعل است. بنابراین، مشعل در شبیه‌سازی گنجانده نشده است و خروجی آن با استفاده از شبیه‌سازی قبلی به صورت پروفایل در شرایط مرزی تعریف شده است. حوزه عددی شامل ناحیه گازی، ناحیه جامد به همراه ناحیه جامد/مایع یعنی محفظه احتراق، بدنه کوره و بار است. شکل ۴ مش مورد استفاده برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این شبکه سه بعدی از ۱۲۲۱۵۶۰ سلول ساخته شده که با استفاده از نرم‌افزار ANSYS ICEM و با استفاده از روش تقسیم‌بندی بلوک ایجاد شد. مش در نقاط حساس با گرادیان‌های دمایی شدید بسیار ریز شده است، از جمله ورودی ناحیه مشعل، اگزوز و مرز نواحی جامد/مذاب و احتراق.

با انتخاب شبکه با این تعداد سلول، خطایی کمتر از ۴٪ نسبت به ریزترین شبکه (۱،۸۳۲،۳۴۰ سلول) مشاهده شد و لذا شبکه محاسباتی این هندسه، با تعداد ۱،۲۲۱،۵۶۰ سلول چهاروجهی غیرساختاری، به عنوان شبکه محاسباتی پایه انتخاب شد. با توجه به حساسیت بالای مدل احتراق، گام زمانی 1×10^{-4} ثانیه و برای اجرای شبیه‌سازی از سیستم ۸ پردازنده ۳ GHz

1. Fuel-Bonded Nitrogen
2. Discrete ordinates method
3. radiative transfer equation
4. Radiation Transfer Equation (RTE)

موازی استفاده شد. با توجه به اینکه تغییر پیکره‌بندی در مجرای ورودی کوره نیز مورد بررسی قرار گرفته است، برای شبیه‌سازی از دو پیکره‌بندی استفاده شد تا تاثیر آن نیز بر عملکرد احتراق مورد بررسی قرار گیرد. ضمناً در شکل ۴ تغییر هندسه و مش آن مشاهده می‌شود.

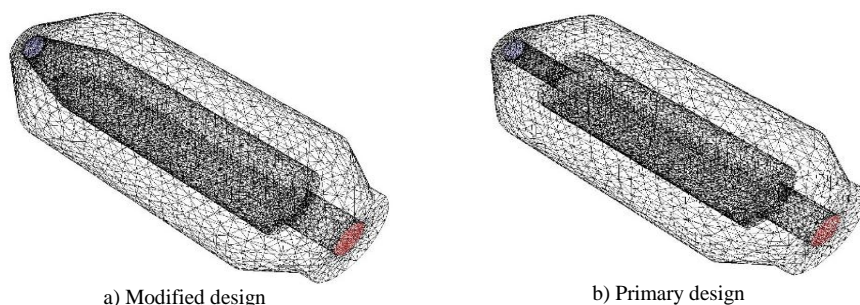


Figure 4- The geometry and computational cells of the rotary kiln with the angles correction

شکل ۴- هندسه و شبکه محاسباتی کوره دوار به همراه اصلاح زوایای آن

مدل‌های اغتشاش اسپالارت-آلماراس^۱ و $k-\omega$ ، در صورتی که از مش ریز در نواحی نزدیک به دیواره استفاده شود، توانایی حل جریان در نزدیکی دیوارها را خواهند داشت. با توجه به اینکه از توابع دیواره استفاده نشده است و از روش مش ریز نواحی مرزی و مدل اغتشاشی SST $k-\omega$ (موفق در شبیه‌سازی‌هایی که اهمیت و دقت لایه مرزی بالایی دارند) استفاده می‌شود، Y^+ می‌بایست تقریباً $Y^+=1$ انتخاب شود که برای پیش‌بینی درست جدایش جریان کافی است. همچنین، در شبکه‌بندی از نرخ رشد کمتر از $1/2$ استفاده شده و ارتفاع اولین سلول لایه مرزی کمتر از $5/3 \times 10^{-6}$ m است. برای صحت‌گذاری استفاده از این نوع مش می‌توان به مقالات و پایان‌نامه ژو استناد کرد که وی نیز از مش غیرساختاری استفاده کرده است [۵۰]. استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

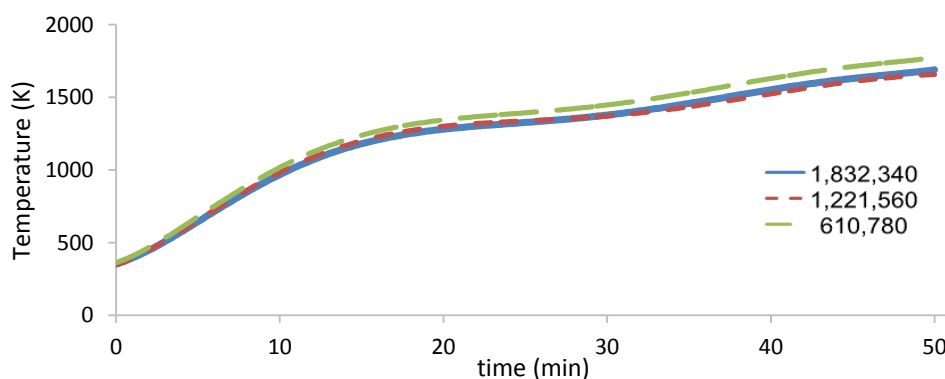


Figure 5- Numerical solution independency test from the computational network

شکل ۵- آزمون استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

شرایط مرزی

شرایط مرزی ورودی ناحیه احتراق به صورت پروفایل سرعت، دما، غلظت گونه‌های ورودی و همچنین پارامترهای مدل آشفستگی، یعنی انرژی جنبشی آشفستگی^۲ و نرخ اضمحلال گردابه^۱ به کوره، که از شبیه‌سازی قبلی مشعل حاصل شده، قرار داده شد. برای

1. Spalart-Allmaras
2. Turbulence Kinetic Energy (k)

مرز خروجی ناحیه احتراق فشار نسبی صفر قرار داده شد. ترکیب شیمیایی مخلوط گازی خروجی مشعل و ورودی کوره به صورت جدول ۳ است. ترکیب سوخت در شرایط مرزی بین شبیه سازی مکانیزم skeletal25 با ترکیب واقعی گاز طبیعی متفاوت است و این مکانیزم اجزای گاز طبیعی را فقط متان در نظر می گیرد و هیدروکربن هایی که در نظر گرفته نمی شوند به درصد متان اضافه می شوند. شرط مرزی حرارتی برای مجاورت نواحی سیال و جامد به صورت مزدوج در نظر گرفته شده است. مطابق مشخصات مشعل، ورودی گاز طبیعی به آن $153/6 \text{ m}^3/\text{h}$ و ورودی هوا $1510 \text{ m}^3/\text{h}$ است که خروجی مشعل شرایط ورودی کوره را تعیین می کند (شکل ۶).

جدول ۲- غلظت گونه های اصلی ورودی به کوره

Table 3- Concentration of main species at the entrance the furnace

Species	CO	CO ₂	N	N ₂	N ₂ O	NO	O	O ₂	H ₂	H ₂ O	OH	CH ₄
Mole fraction (%)	0.800	1.700	0.000	72.152	0.000	0.043	0.006	14.960	0.022	3.457	0.060	6.800

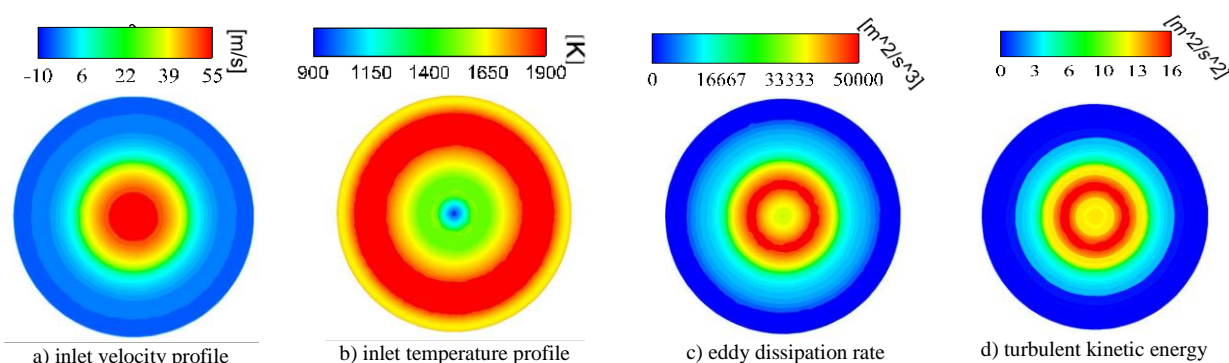


Figure 6- Inlet boundary conditions obtained from previous burner simulation

شکل ۶- پروفایل شرایط مرزی ورودی کوره دوار حاصل از شبیه سازی قبلی مشعل

زمان محاسباتی کل حدود ۱۰۰ ساعت بوده و معیار انتخاب مقیاس زمانی عدد دامکهلر مطابق مرجع [۵۱] است. مقیاس زمانی ریزساختار، که میانگین زمان اقامت ها در مدل EDC است، به شکل معادلات (۱۵) تا (۱۸) تعریف شده است:

$$\tau^* = 1/\dot{m}^* \quad (15)$$

$$\tau^* = \left(\frac{C_{D2}}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2} = C_\tau \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (16)$$

$$\dot{m}^* = \left(\frac{3}{C_{D2}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\varepsilon}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

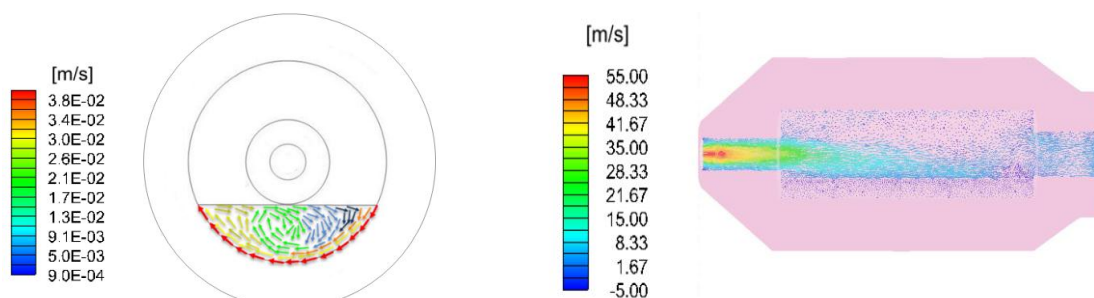
که در آن ثابت های مدل پیش فرض C_{D1} ، C_{D2} ، C_γ و C_τ به ترتیب 0.134 ، 0.5 ، 0.408 و $2/137$ هستند. C_γ و C_τ به ترتیب به عنوان مقیاس زمانی و ثابت کسر حجمی شناخته می شوند. \dot{m}^* نسبت تبادل جرمی بین ریزساختار و اطراف توده ریزساختار است. میانگین نرخ واکنش در هر سلول به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R_i = \frac{\rho(\gamma^*)^2}{\tau^*[1 - (\gamma^*)^3]} (Y_i^* - Y_i) \quad (14)$$

که در آن Y_i^* کسر جرمی گونه در مقیاس ریز، پس از واکنش در مدت زمان مشخصه τ^* است. ρ چگالی و Y_i متوسط کسر جرمی گونه های i در سلول مقیاس ریز است.

بحث و نتایج

در محفظه احتراق کوره دوار، حرارت از گاز داغ از طریق تشعشع و جابه‌جایی به ناحیه جامد/ذوب انتقال می‌یابد. طی دوران قسمتی از حرارت دریافتی دیواره به ناحیه ذوب منتقل و مابقی به صورت هدایت از دیواره کوره تلف می‌شود. به‌طور متوسط در کل زمان کارکرد کوره، ۷۲/۹٪ حرارت به صورت تشعشعی، ۲۳/۵٪ به‌شکل جابه‌جایی و ۳/۶٪ به‌طریق هدایتی دریافت می‌شود. شکل ۷-الف گردابه‌های ایجادشده در ناحیه ذوب را نشان می‌دهد. بردارهای سرعت مماس حاکی از القای سرعت از بدنه دوار به قراضه مذاب بوده و ایجاد جریان چرخشی در ناحیه ذوب را نشان می‌دهد. همچنین، وجود ناحیه مرده^۱ در گوشه سمت راست بردارها جالب توجه است که برای بهبود عیار و یکنواختی مذاب باید از آن اجتناب شود و هر چند دقیقه یکبار (بعد از ذوب عمده قراضه‌ها حدوداً هر ۵ دقیقه) جهت گردش کوره برعکس شد که سبب القای تلاطم لحظه‌ای به مذاب می‌شود. شکل ۷-ب بردارهای سرعت روی صفحه مرکزی را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که بردارهای سرعت، به‌دلیل نیروهای شناوری در نواحی انتهایی کوره، به‌سمت بالا متمایل می‌شوند. در برخی نواحی وجود جریان چرخشی قابل توجه است. با توجه به جریان گازی این ناحیه به دو قسمت تقسیم می‌شود: ناحیه چرخش^۲ که توسط جت کوتاه مشعل ایجاد می‌شود و ناحیه جریان آزاد^۳. اختلاط سوخت و اکسیژن در ناحیه چرخش انجام می‌شود و در این ناحیه اختلاط هم به‌لحاظ طولی و هم شعاعی ایدئال است. در ناحیه جریان آزاد، همان‌طور که در شکل مشخص است، گاز تنها به‌صورت شعاعی اختلاط خوبی دارد و در راستای طول از اختلاط مناسبی برخوردار نیست و بنابراین گرادیان دمایی در راستای طول ایجاد می‌شود.



a) Velocity field of melt region at 2700 s and the center of the furnace

b) Furnace ignition velocity vector on the center plate

Figure 7- Rotary furnace velocity vectors

شکل ۷- بردارهای سرعت کوره دوار شبیه‌سازی شده

شکل ۸ میدان دمای سطح داخلی لایه نسوز (الف) و دمای سطح داخلی بدنه کوره دوار در زوایای مختلف (ب) را نشان می‌دهد. در این شکل نواحی قرمز دماهای بالای ۱۸۰۰ K هستند که در ورودی مشعل مشاهده می‌شوند و نقاط حساس و حیاتی در انتخاب نوع نسوز و زاویه مشعل‌اند. نسوز این کوره توانایی تحمل حداکثر دمای ۱۹۶۵ K را دارد. مطابق نمودار ب ناحیه نسوز در بالاترین نقطه کوره (۹۰ درجه) بیشترین دما را دارد (۱۷۸۶ K) و به‌محض قرارگیری در مجاورت ناحیه مذاب به‌شدت افت دما پیدا می‌کند که در پایین‌ترین نقطه به دمای ۱۵۶۴ K می‌رسد و پس از آن تا زمانی که با ناحیه مذاب در تماس است، با توجه به اینکه نیروی محرکه (اختلاف دمای لایه نسوز و مذاب) به حداقل خود می‌رسد، نرخ کاهش دما کم می‌شود و دو ناحیه تقریباً به تعادل می‌رسند. بررسی حاکی از این است که همواره به‌طور متوسط دمای دیواره نسوز ۱۵۰ K بالاتر از بار جامد/مذاب است.

1. Dead zone
2. Circulation/mixing zone
3. Plug flow zone

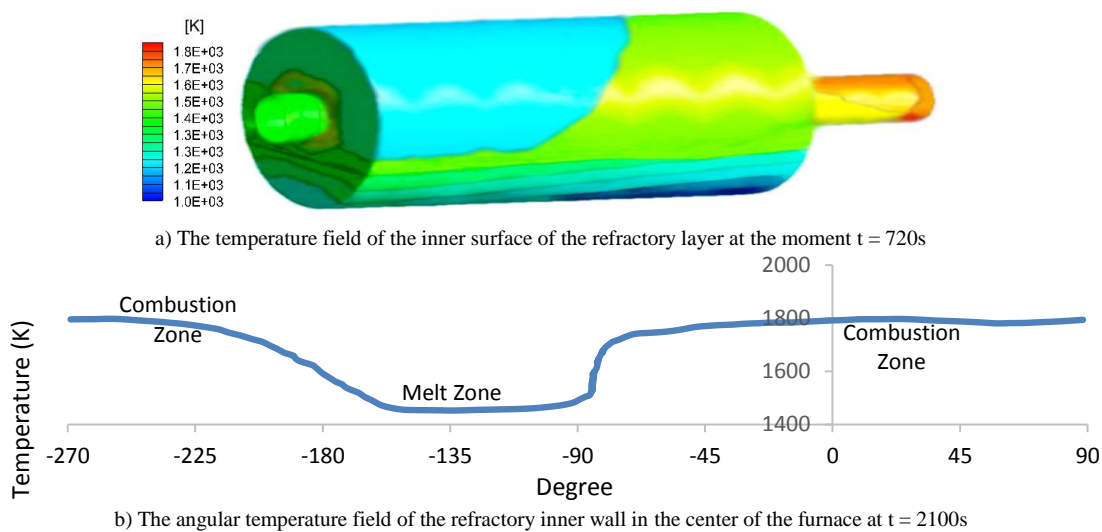


Figure 8- Temperature field of the furnace refractory layer

شکل ۸- میدان دمای لایه نسوز کوره

در شکل ۹، مقایسه نتایج شبیه‌سازی دمای دیواره کوره با نتایج تجربی^۱ ملاحظه می‌شود. مطابق نمودار ۸ در زمان‌های ۲۲، ۲۷، ۳۲، ۳۷، ۴۲ و ۴۷ دقیقه علت کاهش دمای دیواره مربوط به تغییر جهت دوران کوره (ایجاد تلاطم ناگهانی و زمان تماس بیشتر) است. همان‌طور که روی نمودار منظور شده است، به‌طور کلی، کوره حاضر ۳ مرحله اصلی را شامل می‌شود. اولین مرحله پیش‌گرمایش است که دمای قراضه‌ها با دریافت گرما از شعله بی‌وقفه افزایش می‌یابد تا زمانی که به دمای ذوب قراضه نزدیک شوند. سپس، کوره وارد مرحله ۲ می‌شود که مقارن با ذوب قراضه‌هاست. با توجه به آنتالپی ذوب قراضه‌ها و جذب سهم عمده گرمای شعله توسط این ناحیه، دمای نواحی یا ثابت می‌ماند و یا به کندی افزایش می‌یابد، اما در مرحله ۳ حداکثر دمای ناحیه احتراق تقریباً ثابت و دمای نواحی ذوب و دیواره نسوز در حال افزایش است. بنابراین، تفاضل دماها (نیرو محرکه) کاهش می‌یابد و کوره در حال رسیدن به تعادل گرمایی است که در آن سایر نواحی از نظر دمایی به ناحیه احتراق نزدیک می‌شوند. این مسئله در شکل ۱۰ نیز به‌وضوح قابل مشاهده است که میدان دمایی برش مرکزی و نواحی کوره را نشان می‌دهد. این شکل تاثیر تغییر پیکره‌بندی بر توزیع دمای کوره را نیز نمایش می‌دهد.

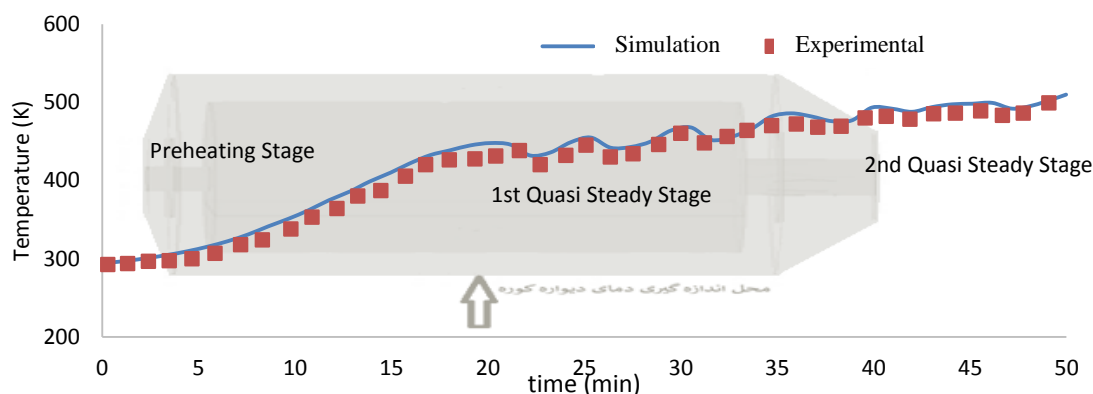


Figure 9- Validation of the simulation in terms of the transient temperature of the outer wall of the rotary furnace

شکل ۹- اعتبارسنجی شبیه‌سازی برحسب دمای گذرای دیواره خارجی کوره دوار

۱. اندازه‌گیری توسط پیرومتر اولتراسونیک در شرکت ریخته‌گری خواجه‌نود

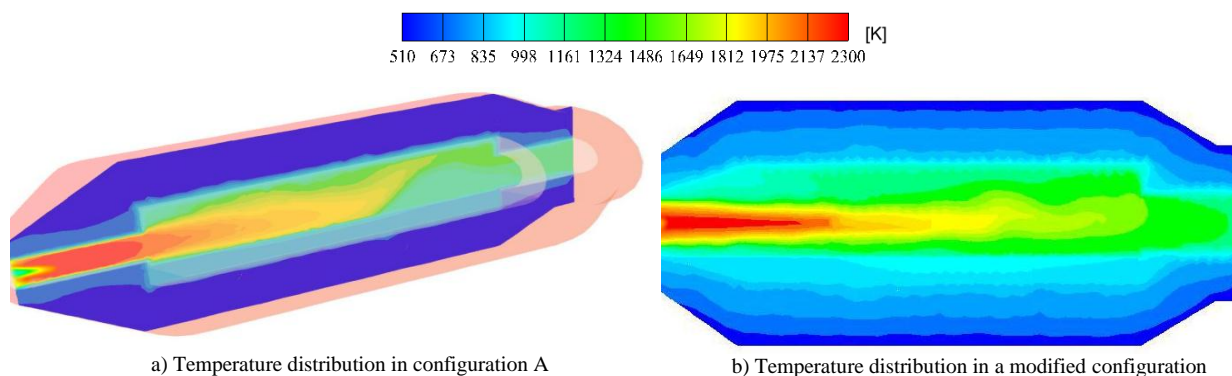


Figure 10- Temperature field of the central plate of the furnace at time $t=1200s$

شکل ۱۰- میدان دمایی صفحه مرکزی کوره در زمان $t=1200s$

مطابق شکل، هرچند توزیع دمای یکنواخت‌تری در پیکربندی شکل ب ملاحظه می‌شود، اما از طرفی دیگر اتلاف حرارت بیشتری نیز در آن از دیواره‌ها مشاهده می‌شود. لذا، با افزودن لایه دیگری از عایق، مانند پشم سنگ که برای کوره‌های دوار موجود امری ضروری است، پیکربندی شکل ب به دلیل مصرف سوخت کمتر در حدود ۵٪ و ذوب‌دهی بیشتر مناسب‌تر است. دمای کارکردی کوره در شرایط پایا با دمای متوسط آن شناخته می‌شود که در این کوره می‌توان آن را 1800 K بیان کرد. حداکثر دمای کوره در نواحی احتراقی 2266 K است که در 48 سانتی‌متری ورودی کوره رخ می‌دهد.

شکل ۱۱ تغییرات دمای طولی نواحی احتراق و غلظت گونه‌های CO و OH را روی محور مرکزی کوره دوار نشان می‌دهد. با حضور این گونه‌ها می‌توان نواحی عمده واکنش را تشخیص داد. حداکثر غلظت OH در $50/8$ سانتی‌متری دهانه کوره براساس مکانیسم skeletal25 رخ داده است. به همین ترتیب، حداکثر غلظت CO در $42/6$ سانتی‌متری مشاهده می‌شود. هرچند شیمی گونه‌های رادیکالی بسیار سریع است، اما از تعادل به دورند، زیرا غلظت گونه‌های رادیکال در منطقه واکنش به نرخ واکنش بستگی دارد که به نوبه خود به غلظت واکنش دهنده‌ها و نه فقط به دما بستگی دارد. در حالت تعادل، غلظت گونه‌های رادیکال فقط به واکنش‌های تفکیک در دماهای بالا بستگی دارد. توصیف منطقه واکنش با مدل احتراق EDC نشان داده که مشعل در شرایطی کار می‌کند که شعله از محل انژکتور سوخت جدا شده است و شرایط برآمدگی^۱ شعله را پیش‌بینی کرده است.

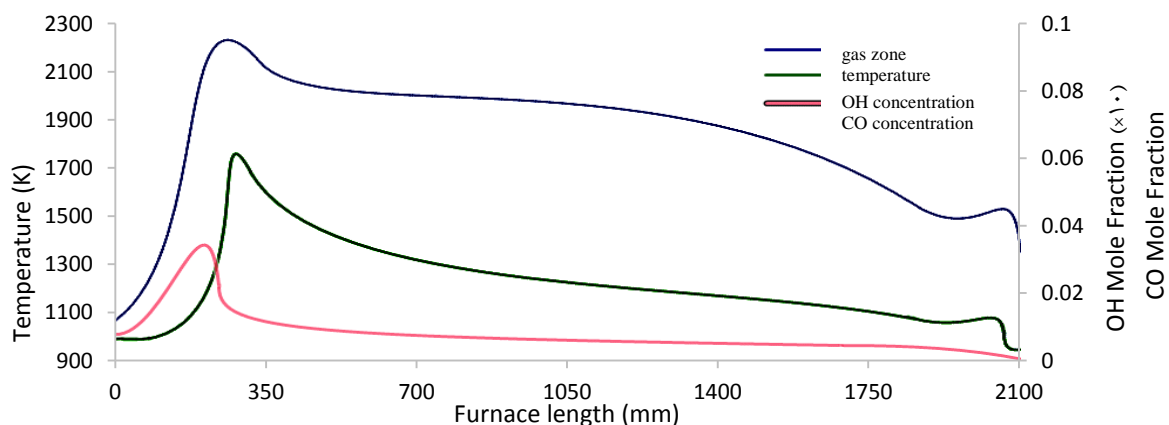


Figure 11- Distribution of temperature and species on the furnace central axis at $t = 900\text{ s}$

شکل ۱۱- توزیع دما و گونه‌ها روی محور کوره در لحظه $t=900\text{ s}$

1. liftoff

طبق نمودار، مقایسه نتایج از دقت مناسب شبیه‌سازی حکایت دارد. اکنون با استفاده از کوره شبیه‌سازی شده و به کمک طراحی آزمایش، تاثیر درصد هوای اضافی، میزان پیش‌گرمایش هوا و سرعت دورانی بر مصرف ویژه سوخت و تولید آلاینده‌ها در احتراق احیائی و اکسیدی پیش‌بینی می‌شود. در جدول ۴، معیار مقایسه پارامترهای مورد بررسی مشخص شده است. مصرف ویژه سوخت عبارت است از میزان مصرف سوخت به‌ازای هر کیلوگرم از بار جامد (m^3/kg). با توجه به اینکه دبی سوخت ثابت است، این پارامتر خودبه‌خود معادل نرخ و زمان ذوب‌دهی است (معادلات (۱۹) و (۲۰)). لذا، با توجه به معیار پایان شبیه‌سازی (رسیدن مذاب به دمای $1773 K$)، هرچه مذاب زودتر به این دما برسد، مصرف ویژه سوخت نیز کمتر خواهد بود. مسلماً کاهش مصرف سوخت کاهش توده‌ای آلاینده‌ها را نیز در پی خواهد داشت. حداکثر سرعت دورانی در کارگاه حاضر، $2 rpm$ در نظر گرفته شده و درصد هوای اضافی از نظر نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا^۱ در بازه هوای 90% تا 140% (احیائی تا اکسیدی) بررسی شده است. همچنین، از نظر سازمان حفاظت محیط زیست حد انتشار مجاز درجه ۱ برای آلاینده ناکس کوره $800 mg/Nm^3$ ($390 ppm$) و برای آلاینده CO ، $500 mg/Nm^3$ ($400 ppm$) است.

$$\frac{Sp. Fuel (m^3/kg) * load weight (kg)}{fuel flow rate (m^3/hr)} \times 60 = \text{melting time (minute)} \quad (19)$$

$$\frac{load weight (kg)}{\text{melting time (minute)}/60} = \text{melting rate (kg/hr)} \quad (20)$$

جدول ۳- تعریف پارامترهای عملکردی کوره

Table 4- Definition of the furnace performance parameters

Quantity	Excess Air%	Rotational Speed	Preheated air T	Specific Fuel Consumption	NOx	CO
Criteria (Dimensionless Number)	F/A Equivalence ratio	Test Speed (rpm) Max. Speed (rpm)	Preheated air T (K) Adiabatic Flame T (K)	Fuel Consumption (m^3) Scrap load (kg)	NOx (ppm) Allowable limit (ppm)	CO (ppm) Allowable limit (ppm)

در شکل ۱۲، نتایج آزمایش عملکرد کوره در شرایط مختلف ملاحظه می‌شود. حداکثر دمای قابل دسترسی پیش‌گرمایش هوا با استفاده از پیش‌گرم‌کن پوسته و لوله حدود $700 K$ است که به سطح تبادل و نرخ سیال سرد و گرم بستگی دارد. با توجه به اینکه دمای خروجی کوره به‌طور متوسط در حدود $1300 K$ است، می‌توان با استفاده از مبدل‌های حرارتی فشرده هوا را تا حدود $1000 K$ هم پیش‌گرم کرد که آثار جالب توجهی در افزایش درخشندگی شعله، بهبود بازده احتراق و افزایش دمای شعله خواهد داشت، چرا که دمای آن به دمای اشتعال گاز طبیعی ($901 K$) نزدیک است و به محض برخورد هوای گرم به سوخت می‌تواند سبب اشتعال سوخت شود. اگرچه این موضوع اثر منفی بر تولید آلاینده‌ها دارد. مطابق آزمون‌های انجام‌شده تولید NOx تا $18/9\%$ هوای اضافه افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش هوای اضافه روند کاهش دارد، اما شعله احیائی NOx کمتر و CO بیشتر در حدود $1900 ppm$ دارد که می‌توان با اصلاحاتی در خروجی کوره احتراق را کامل و آلاینده را کاهش داد. با لحاظ سطح 10 مترمربعی مبدل حرارتی حاضر، بالاترین بازده بازیابی حرارتی مبدل (از منظر سرعت سیال عبوری) در $8/8\%$ هوای اضافی رخ می‌دهد که این مورد نیز بررسی شده است. بهترین عملکرد از نظر کاهش مصرف سوخت و آلاینده مشاهده می‌شود. با افزایش بیشتر هوای اضافی، از دمای شعله کاسته شده و مصرف سوخت افزایش می‌یابد. دوران در انتقال حرارت دیرگداز به قراضه و مذاب نقش ویژه‌ای دارد و با افزایش سرعت، این اثر افزایش می‌یابد، ولی سرعت‌های دورانی زیاد زمان تماس لایه دیرگداز با قراضه را کاهش داده و سرعت ذوب‌دهی را نیز کاهش می‌دهد. از طرفی، افزایش سرعت دوران در افزایش تلاطم ناحیه مذاب نیز نقش دارد که اثر وجود ناحیه مرده در ناحیه مذاب و کاهش انتقال حرارت ناشی از آن را از بین می‌برد. بنابراین، یافتن مقداری بهینه بین این پارامتر می‌تواند به بهبود انتقال حرارت از دیرگداز به مذاب نقش مهمی داشته باشد. در کوره مورد مطالعه سرعت دورانی بهینه، از منظر مصرف سوخت، $5/5 rpm$ به‌دست آمده است.

1. Equivalence ratio

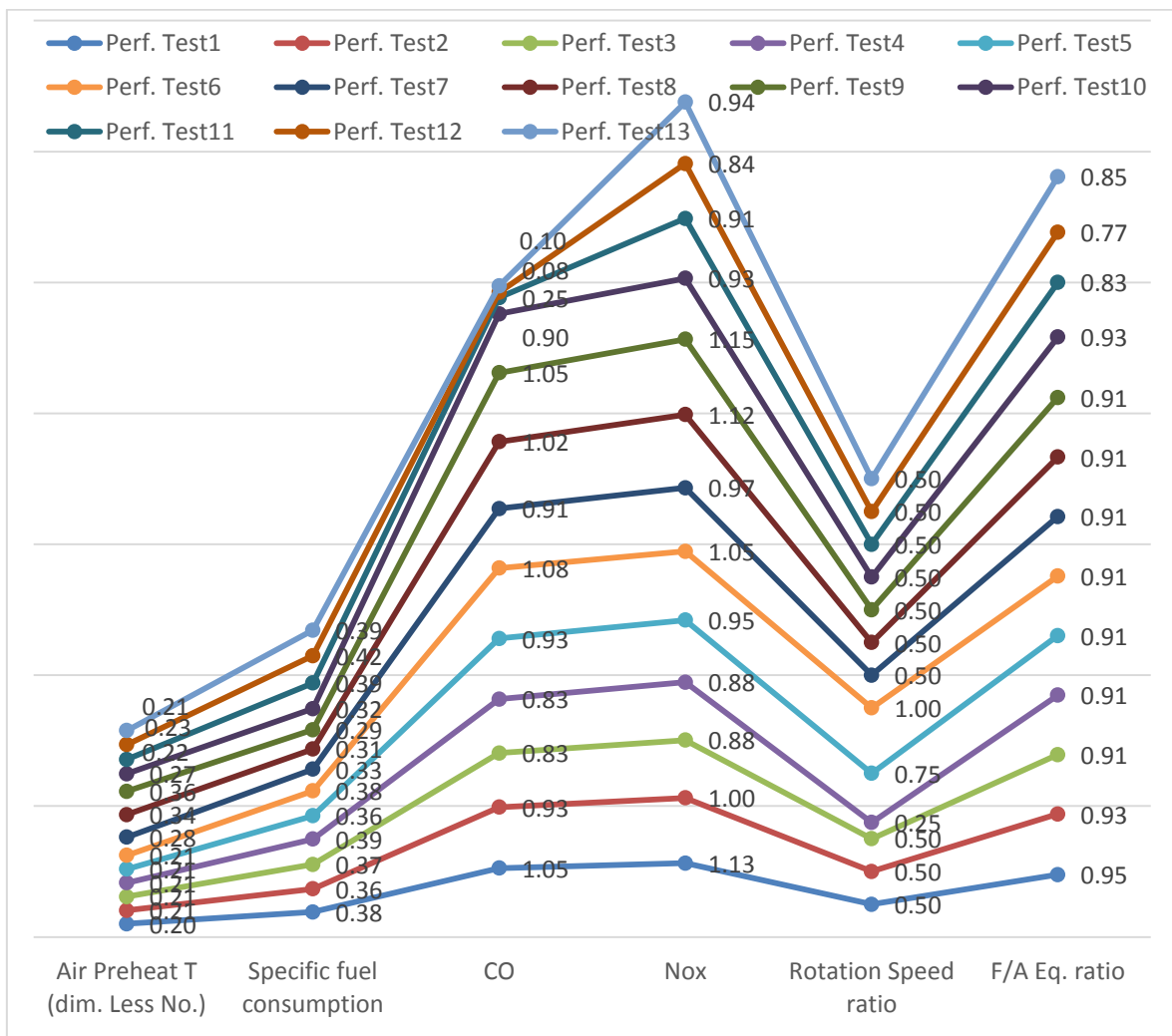


Figure 12- Results of performance tests of rotary furnace simulation in terms of fuel consumption and production of pollutants
 شکل ۱۲- نتایج آزمون‌های عملکردی شبیه‌سازی کوره دوار از منظر مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی کوره ۳۵۰ کیلوگرمی صنعتی با داده‌های کاملاً صنعتی و عملیاتی نواحی مذاب، احتراق و دیواره نسوز، از نظر هیدرودینامیکی و حرارتی بررسی و تحلیل و با استفاده از داده‌های تجربی صنعتی (نمودار ۸) اعتبارسنجی شد. مشخص شد که CO در برابر افزایش درصد هوا (از احیائی با ۹۰٪ تا اکسیدی با ۱۴۰٪) روندی همواره نزولی دارد و با افزایش درصد هوای اضافه سریعاً کاهش می‌یابد و این به دلیل سینتیک سریع مصرف آن در مقابل سینتیک کند مصرف NO است. مصرف ویژه سوخت در شعله احیائی بیشتر است و با افزایش درصد هوای اضافی، تا ۸/۸٪ کاهش می‌یابد و پس از آن مجدداً با افزایش روبه‌روست؛ مسئله‌ای که به کاهش دمای شعله و متوسط کوره و کاهش ماند گازهای احتراقی و انتقال حرارت می‌انجامد. مشاهده شد که شعله اکسیدی با ۸/۸٪ هوای اضافی بهترین عملکرد از نظر احتراق (مصرف سوخت و تولید آلاینده کمتر) را دارد، اما سبب اتلاف بیشتر آلیاژی (در حدود ۲۰٪) می‌شود، اما در شعله احیائی اتلاف بسیار کم و در حدود ۱٪ است، ولی آلاینده‌گی و مصرف سوخت بیشتری دارد.

تشکر و قدردانی

از شرکت گاز استان به لحاظ حمایت مالی از پروژه و از آقای مهندس عادل، مدیرعامل محترم شرکت شعله صنعت، به خاطر همکاری در ارائه اطلاعات آزمایش‌های تجربی صمیمانه تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

1. Z. Gholamreza, and A. Zahra, *Estimating the level of support for the country's steel industry*, Business Research Journal, University of Sistan and Baluchestan, pp. 137-149, Zahedan, 2011.
2. C. E. Baukal Jr, *Oxygen-enhanced combustion*, Air products and chemicals Inc., Allentown, Pennsylvania, CRC press, 2010.
3. J. A. Green, *Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2007.
4. J. G. Kaufman, and E. L. Rooy, *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2004.
5. P. R. Bruggink, and K. J. Martchek, "Worldwide recycled aluminum supply and environmental impact model," *LIGHT METALS-WARRENDALE-PROCEEDINGS*, TMS, Charlotte, North Carolina, 2004.
6. Last investigation, Introduction, Title: Investigation of the condition of furnaces and burners of industrial units in Tehran province in the fields of smelting and heat treatment of metals and glass smelting, report, Tehran, 2002.
7. A. A. Koodehi, S. V. Givi, and H. Haghighipour, "A natural gas burner and combustion system for easy iron rotary furnaces," *Fourth Iran Fuel and Combustion Conference*, Iran, 2012.
8. S. O. Omole, and R. T. Oluyori, "Optimization of recuperative system in rotary furnace for minimization of elemental loss during melting", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2, No. 06, 2014, p. 579-585.
9. J. Colannino, D. W. Karkow and C. A. Wiklof, Perforated burner for a rotary kiln, 2017, Google Patents, Accessed 28 Nov. 2017.
10. R. Bandyopadhyay and et al., "Assessment of ash deposition tendency in a rotary kiln using Thermo-mechanical analysis and Experimental Combustion Furnace", *Fuel*, 135, 2014, pp. 301-307.
11. S. P. Gangoli and et al., Selective oxy-fuel burner and method for a rotary furnace, 2017, Google Patents, Accessed 27 Jun. 2017.
12. Sh. Marzban Shirkharkolai and A. Marzban Shirkharkolai "Border guards of infants, pollution from cast iron rotary furnaces," *second conference on environmental planning and management*, Tehran, 1391.
13. G. Patange, and M. Khond, "Some studies on energy consumptions and identification of suitable energy management techniques in Indian foundry industries," *European Scientific Journal (ESJ)*, 9, No. 24, 2013, pp. 56-64.
14. R. I. Singh, A. Brink and M. Hupa, "CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification" *Applied Thermal Engineering*, 52, No. 2, 2013, pp. 585-614.
15. B. Mayr and et al., "CFD and experimental analysis of a 115 kW natural gas fired lab-scale furnace under oxy-fuel and air-fuel conditions," *Fuel*, 159, 2015, pp. 864-875.
16. M. Rahimpour, K. Mazaheri and S. H. Seyedein, "Numerical Study of the Effect of Burner Angle on Melting Rate in an Aluminum Rotary Furnace," *Modares Mechanical Engineering*, 14, No. 16, 2015, pp. 252-260.
17. T. Bourgeois and et al., "Mathematical modeling of an aluminum casting furnace combustion chamber," *Metallurgical and Materials Transactions B*, 20, No. 3, 1989, pp. 421-429.
18. C. Hoogendoorn, C. Koster and J. Wieringa, "Computational modelling of turbulent flow, combustion and heat transfer in glass furnaces," *Sadhana*, 19, No. 5, 1994, pp. 723-749.
19. A. O. Nieckele, M. F. Naccache and M. S. P. Gomes, "Combustion performance of an aluminum melting furnace operating with natural gas and liquid fuel," *Applied Thermal Engineering*, 31, No. 5, 2011, pp. 841-851.
20. D. R. Jain, "Experimental investigations of effect of oxygen enrichment of preheated air on performance," *Specific fuel and Energy Consumption of Rotary Fired Furnace. IJPSS, ISSN*, 8, 2012, pp. 2249-5894.
21. R. Jain, "Regression Analysis of Innovative Melting Technique for Energy Conservation in Foundry Industry," *Indian Foundry Journal*, 60, No. 10, 2014, pp. 29-34.
22. R. Jain, "Modeling, Optimization and Simulation of input parameters for optimum specific fuel (energy) consumption of LDO fired Rotary furnace," *International Journal of Applied Engineering Research*, 2, No. 1, 2011, pp. 38-47.
23. C. Belt, "Current State of Aluminum Melting and Holding Furnaces in Industry," *JOM*, 67, No. 11, 2015, pp. 2690-2695.
24. R. Prieler and et al., "Evaluation of a steady flamelet approach for use in oxy-fuel combustion," *Fuel*, 118, 2014, pp. 55-68.
25. A. Fazl Elahi Qomshi, and A. Mardani, "Numerical simulation of combustion flow in the combustion chamber of a gas turbine model with dual torsional air inlet technology," *Fuel and Combustion*, 9, No. 2, 2016, pp. 15-29
6. A. Gunnarsson and et al., "Radiative heat transfer conditions in a rotary kiln test furnace using coal, biomass, and cofiring burners," *Energy & Fuels*, 31, No. 7, 2017, pp. 7482-7492.
27. H. Elattar, et al., "CFD simulation of confined non-premixed jet flames in rotary kilns for gaseous fuels," *Computers & Fluids*, 102, 2014, pp. 62-73.

28. A. Parente, C. Galletti, and L. J. I. j. o. h. e. Tognotti, "Effect of the combustion model and kinetic mechanism on the MILD combustion in an industrial burner fed with hydrogen enriched fuels," *International journal of hydrogen energy*, 33, No. 24, 2008, pp. 7553-7564.
29. R. Prieler and et al., "Numerical investigation of the steady flamelet approach under different combustion environments," *Fuel*, 140, 2015, pp. 731-743.
30. D. Lupant, and P. J. A. T. E. Lybaert, "Assessment of the EDC combustion model in MILD conditions with in-furnace experimental data," *Applied Thermal Engineering*, 75, 2015, pp. 93-102.
31. Y. Ding and et al., "Experimental and numerical simulation of multi-component combustion of typical charring material," *Combustion and Flame*, 211, 2020, pp. 417-429.
32. M. Y. Chernetskiy and et al., "Comparative analysis of turbulence model effect on description of the processes of pulverized coal combustion at flow swirl," *Thermophysics and aeromechanics*, 23, No. 4, 2016, pp. 591-602.
33. N. K. Sahu, M. Kumar and A. J. J. o. E. R. T. Dewan, "Computational Study of 16 KWth Furnace Cofired Using Pulverized Bituminous Coal and LPG Operated in Un-Staged and Air-Staged Conditions," *Journal of Energy Resources Technology*, 2020, pp. 1-38.
34. N. Bohlooli Arkhazloo, *Optimization of furnace residence time and ingots positioning during the heat treatment process of large size forged ingots*, Doctoral dissertation, École de technologie supérieure.
35. J. Coringa and et al., "Numerical investigation for steam tubes temperature reduction in a four fuels tangentially fired boiler," *Applied Thermal Engineering*, 115656179, 2020, pp. 179-186.
36. A. Kumar and et al., "CFD analysis of solar air heater having corrugated absorber plate," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 7, No. 9, 2017, pp. 575-5587.
37. M. F. Modest, "The weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary solution methods in radiative transfer," *Journal of heat transfer*, 113, Issue 3, 1991, pp. 650-656.
38. T. Smith, Z. Shen and J. Friedman, "Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model," *Journal of heat transfer*, 104, Issue 4, 1982, pp. 602-608.
39. D. Edwards, and R. Matavosian, "Scaling rules for total absorptivity and emissivity of gases," *Journal of heat transfer*, 106, Issue 4, 1984, pp. 684-689.
40. A. Brent, V. Voller and K. Reid, "Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal," *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, 13, No. 3, 1988, pp. 297-318.
41. *University of California at San Diego*, "Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications," *San Diego Mechanism*. [Online], 2016, Available from: Available (online), <http://combustion.ucsd.edu>, 2011.
42. G. P. Smith, 1999, GRI-Mech 3.0. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
43. A. Kazakov, and M. Frenklach, Reduced reaction sets based on GRI-Mech 1.2. University of California at Berkeley, Berkeley, CA, 1994, <http://www.me.berkeley.edu/drm>.
44. T. Peeters, *Numerical modeling of turbulent natural-gas diffusion flames*, PhD thesis, Delft Technical University, Delft, The Netherlands, 1995.
45. Y. Zeldovich, D. Frank-Kamenetskii and P. Sadvnikov, *Oxidation of nitrogen in combustion*, Publishing House of the Acad of Sciences of USSR, Moscow, 1947.
46. C. Fenimore, "Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames," *Symposium (international) on combustion*, Elsevier, Volume 13, Issue 1, pp. 373-380, 1971.
47. S. De, and G. DE Soete, "Overall reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen," *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 15, No. 1, 1975, pp. 1093- 1102.
48. T. Smith, Z. Shen, and J. Friedman, "Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model," *Journal of heat transfer*, 104, No. 4, 1982, pp. 602-608.
49. FLUENT, A., 14.5 User's & Tutorial Guide, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 2012.
50. B. Zhou and et al., "CFD-based process modelling of a rotary furnace for aluminium scrap melting," *Home, Progress in Computational Fluid Dynamics*, CFD-based process modelling of a rotary furnace, 7, No. 2-4, 2007, pp. 195-208.
51. A. J. F. Mardani, "Optimization of the Eddy Dissipation Concept (EDC) model for turbulence-chemistry interactions under hot diluted combustion of CH₄/H₂," *Fuel*, 191, 2017, pp. 114-129

English abstract

An experimental study and 3D simulation of a cast iron rotary

Behzad Bayramlu¹, Seyed Mohammad Miranjafzadeh² and Rahmat Sotoudeh Gharabagh^{3*}

1- Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, University of Tehran, Tehran, behzad.bt70@gmail.com

2- Chemical Engineering, Tehran Province Gas Company (NIGC), mirnajafi@gmail.com

3- Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, University of Tehran, Tehran, sotoudeh@ut.ac.ir

* Corresponding author

(Received: 2021.01.15, Received in revised form: 2021.04.26, Accepted: 2021.05.08)

In this study, the computational fluid dynamics (CFD) simulation of an experimental 350 kg cast iron rotary furnace was conducted for the aim of optimizing its fuel consumption and pollutants reduction. The furnace is divided into 3 distinct simulation zones: a) solid charge zone with liquid-solid phase, b) combustion zone with gas phase, and c) solid rotating zone or furnace refractory wall. These three zones are three-dimensionally and transiently modeled in terms of the leading phenomena within each zones and interfaces. The simulation in each region is based on the simultaneous solution of hydrodynamic equations, including vortex dissipation and chemical reaction kinetics equations. The simulation results for the outside wall temperature of the furnace body are in close agreement with the data obtained from experimental units. Furthermore, melting rate, NO_x and CO pollutant generation, specific fuel consumption, rotating speed, preheating of combustion air, excess air percentage, and pollutant production were all evaluated in this simulation. Changing the furnace configuration decreases fuel consumption by 5%, which is important in terms of improving fuel consumption and alloy product quality in this furnace. The results of this study can be used to optimize the industrial rotary furnace operations.

Keywords: Rotary furnace, natural gas, computational fluid dynamics, combustion, melting