

تأثیر تغییر زاویه‌ی ورودی سامانه بازچرخانی داخلی محصولات احتراق بر عملکرد کوره احتراق بدون شعله

مهران کرامتی پور^۱، محمد ضابطیان طرقي^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، mehran_keramati@modares.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، zabetian@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۱/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵)

چکیده: در این مطالعه، شرایط حاکم بر یک کوره‌ی احتراق بدون شعله‌ی سوخت گاز طبیعی و هوا با سامانه‌ی بازچرخانی داخلی مجهز به بازو جهت افزایش ضریب بازچرخشی در مقیاس آزمایشگاهی بررسی خواهد شد. تأثیر تغییر زاویه‌ی آن بر پارامترهای احتراق بدون شعله نظیر حرارت آزاد شده، توزیع دما و ضریب بازچرخانی داخلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با افزایش زاویه‌ی بازو و بازتر شدن هندسه تا ۶۰ درجه جریان به داخل کوره بهتر هدایت می‌شود و حجم ناحیه‌ی بازچرخانی در هندسه با زاویه‌ی بازو ۶۰ درجه بیشترین مقدار است. با مقایسه‌ی مقدار ضریب بازچرخانی در کل کوره مشاهده می‌شود که تأثیر اصلی آن به روی ناحیه‌ی بازچرخانی است که منجر به تغییرات یکنواختی دما و حرارت آزاد شده می‌شود. با بررسی بیشینه حرارت آزاد شده می‌توان نتیجه گرفت طرح هندسه با زاویه‌ی ۳۰ درجه بازو بهترین هندسه‌ی پیشنهادی برای کاربردهای عملیاتی حرارتی است با بررسی نتایج دما نتیجه شد که با کمتر بودن زاویه‌ی بازو سامانه (بسته‌تر شدن سامانه) و تجمع بیشتر جریان احتراقی درون آن، دما از ۱۷۲۷ کلوین (برای هندسه‌ی بدون بازو) به مقدار ۱۷۳۸ کلوین (برای زاویه‌ی بازو ۱۵ درجه) افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: کوره‌ی احتراق بدون شعله، تغییر زاویه‌ی بازو، توزیع دما، سامانه‌ی بازچرخانی داخلی، ضریب بازچرخشی

مقدمه

پیش گرمایش هوای احتراق از جمله مؤثرترین و مهم‌ترین روش‌ها برای افزایش بازدهی سامانه‌های احتراق که در فرایندهای دما بالا به کار می‌رود، است. رژیم احتراق بدون شعله^۱ برای نخستین بار به‌منظور کاهش میزان تشکیل ناکس (اکسیدهای نیتروژن)^۲ حرارتی با استفاده از هوای پیش گرم شده، در مشعل‌های کوره‌های صنعتی توسعه پیدا کرد. این فن‌آوری که احتراق بدون شعله معرفی شد، هم اکنون در صنعت‌های مختلف در حد بالایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس شرایط ورودی به محفظه احتراق در کوره، رژیم احتراق بدون شعله زمانی حاصل خواهد شد که دمای مخلوط سوخت و هوای ورودی به محفظه احتراق بیشتر یا مساوی دمای خوداشتعالی مخلوط باشد و همچنین هم‌زمان اختلاف دمای محفظه احتراق نسبت به دمای پیش گرمایش از دمای خوداشتعالی سوخت کمتر باشد. ویژگی اصلی احتراق بدون شعله این است که دارای شعله حجیم و بلند است [۱].

جهت ایجاد احتراق بدون شعله، لازم است تا گازهای حاصل از احتراق بازچرخانیده شده تا غلظت اکسیژن در ناحیه واکنش به‌طور موضعی کاهش یابد و در اثر این کاهش غلظت، سرعت واکنش‌های اکسیداسیون کاهش یافته و ناحیه‌ی واکنش

^۱ MILD

^۲ NOx

در حجم وسیعی گسترش می‌یابد. همچنین جهت حفظ پایداری واکنش‌های اکسیداسیون، به پیش‌گرم کردن هوای ورودی نیاز است که این کار معمولاً به‌وسیله‌ی بازیابی حرارت از گازهای داغ خروجی از محفظه‌ی احتراق توسط مبدل حرارتی انجام می‌شود. بنابراین آگاهی از نحوه‌ی بازچرخش محصولات احتراق، تعریفی کمی از آن و شناخت حدود بازچرخش جهت ایجاد و حفظ شرایط پایدار احتراق بدون شعله، اهمیت زیادی دارد. همچنین شناخت میزان پیش‌گرمایش هوای ورودی به محفظه‌ی احتراق و اثر آن بر مشخصات احتراق بدون شعله نیز امری ضروری است.

در رژیم احتراق بدون شعله، باید جت هوا یا سوخت با سرعت بالا وارد محفظه‌ی احتراق شود. در این صورت، به دلیل سرعت بالای جت ورودی هوا یا سوخت، مقدار زیادی از واکنش‌دهنده‌ها وارد محفظه‌ی احتراق می‌شوند تا قبل از شروع واکنش‌های احتراقی بین سوخت و اکسیدکننده، دمای داخل محفظه را به دمایی بالاتر از دمای خود اشتعالی^۱ سوخت برسانند [۲]. نسبت بازچرخش که معیاری از میزان رقیق‌سازی واکنش‌دهنده‌ها توسط محصولات احتراق است، طبق رابطه‌ی (۱) به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$K_v = \frac{M_E}{M_F + M_A} = \frac{M_J - (M_F + M_A)}{M_F + M_A} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، K_v نسبت بازچرخش داخلی، M_F و M_A به ترتیب دبی جرمی جریان سوخت و هوا را نشان می‌دهند. همچنین M_E دبی جرمی جریان بازچرخش شده‌ی داخلی بوده و M_J مجموع دبی جرمی جریان سوخت، هوا و جریان بازچرخش شده‌ی داخلی است.

وقتی سوخت با هوا مخلوط می‌شود، مقداری گرما جهت شروع احتراق لازم است که در فرآیند احتراق معمولی، اغلب از محصولات بازچرخش شده‌ی احتراق پشت‌نگه‌دارنده‌ی شعله^۲ یا یک شعله‌ی پیلوت^۳ جهت احتراق پایدار در کوره استفاده می‌شود. به‌هرحال اگر قبل از اختلاط هوا و سوخت، هوا به‌اندازه‌ی کافی گرم شود احتراق جایی در پایین‌دست و پس از اختلاط انجام می‌شود. حتی اگر شعله در نواحی نزدیک جت سوخت به‌وسیله‌ی یک حرکت برشی قوی^۴ خاموش شود، احتراق به‌صورت خود به‌خودی پس از اختلاط جریان هوا و سوخت انجام می‌شود [۴، ۵]. در نتیجه میزان دمای هوای پیش‌گرم شده باید به‌اندازه‌ای بالا باشد که در داخل آن سوخت گازی به‌صورت خود به‌خودی مشتعل شده و احتراق به‌صورت پیوسته و پایدار انجام شود.

رقیق‌سازی اکسیژن و افزایش دمای سوخت و هوا از شرایط لازم برای ایجاد رژیم احتراق بدون شعله هستند. این شرایط می‌توانند با بازچرخانی محصولات احتراقی فراهم شوند. سه روش اصلی برای بازچرخانی محصولات احتراقی وجود دارد. در روش اول، محصولات احتراقی در خروجی کوره وارد مبدل حرارتی می‌شوند و با هوای ورودی پیشگرم شده مخلوط می‌شوند. این روش به‌عنوان بازچرخانی محصولات احتراقی غیرمستقیم شناخته می‌شود. در این روش، رقیق‌سازی اکسیژن به‌اندازه‌ای انجام می‌شود که احتراق بدون شعله تشکیل شود. در روش دوم، محصولات احتراقی در خروجی کوره با هوای ورودی و سوخت مخلوط می‌شوند. این روش به‌عنوان بازچرخانی محصولات احتراقی مستقیم شناخته می‌شود. در این روش، رقیق‌سازی اکسیژن و پیش‌گرمایش مخلوط ورودی به‌طور هم‌زمان انجام می‌شوند [۶، ۷]. در روش سوم، فاصله بین نازل‌های سوخت و هوا زیاد می‌شود. این روش به‌عنوان بازچرخانی محصولات احتراقی توسط فاصله نازل شناخته می‌شود. در این روش، اختلاط سوخت و هوا در پایین‌دست انجام می‌شود و واکنش‌های شیمیایی با تأخیر آغاز می‌شوند. به‌منظور ایجاد رژیم احتراق بدون شعله، رقیق‌سازی اکسیژن و پیش‌گرمایش مخلوط ورودی توسط بازچرخانی محصولات احتراقی صورت می‌گیرد [۸].

اثرات رقیق‌کننده و بدنه بلوف در تشکیل و عملکرد احتراق بدون شعله کوچک مقیاس شده و همچنین توزیع دما، در مطالعه‌ی حسینی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۴، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به‌دست آمده با احتراق کوچک مقیاس شده

¹ Auto ignition

² Flame holder

³ Pilot flame

⁴ Strong shear motion

پيش آميخته مقايسه شد. نرم افزار شبیه سازی انسیس بوده و از مدل $k-\epsilon$ standard برای مدل سازی آشفتگی و همچنین برای مدل سازی احتراقی از EDC¹ استفاده شد. هنگامی که از بدنه ی بلاف در ناحیه ی ورودی محفظه استفاده می کنیم، توزیع دما و پایداری شعله مناسب تری حاصل می شود و در نتیجه عملکرد احتراق بدون شعله بهبود می یابد. همچنین می توان نتیجه گرفت که استفاده از بدنه بلاف باعث انتقال دمای بیشینه به سمت ورودی محفظه می شود.

لیو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۵ به اثر طول و ارتفاع صفحه بازتاب کننده در یک کوره متان پرداختند. آن ها جهت شبیه سازی عددی خود از نرم افزار تجاری فلوئنت ۱۳ استفاده کردند. مدل اغتشاشی در نظر گرفته شده نیز مدل Realizable $k-\epsilon$ بود. از مدل EDC با مکانیسم GRI 3.0 برای مدل سازی مخلوط سوخت و هوا استفاده شد. آن ها نتیجه گرفتند که افزایش طول و قطر صفحه بازتاب کننده باعث افزایش زمان ماندن محصولات، افزایش ناحیه بازچرخشی و کاهش محسوس آلاینده ها مخصوصاً ناکس حرارتی و افزایش کیفیت احتراق بدون شعله می شود.

وانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۱ یک روش جدید را برای بهبود پایداری احتراق بدون شعله با قرار دادن یک دستگاه چرخش داخلی (IRD) در محفظه احتراق پیشنهاد می کنند. آن ها احتراق بدون شعله را در بویلرها مورد بررسی قرار دادند. در بویلرها از لوله های آب سرد برای جذب گرمای احتراق استفاده می شود که این موضوع مانع ایجاد محیط با درجه حرارت بالا و یکنواخت در کوره می شود. از این رو از احتراق بدون شعله در بویلرهای صنعتی استفاده نمی شود. در این مطالعه با قرار دادن یک دستگاه چرخش داخلی، امکان سنجی احتراق بدون شعله در بویلرها به صورت عددی و تجربی برای سوخت گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پیکربندی، پیش مخلوط هوا و سوخت با سرعت کافی بالا وارد دستگاه چرخش داخلی می شود و احتراق در داخل دستگاه رخ می دهد. گاز دودکش از سامانه بازچرخانی خارج می شود و سپس بین دیواره کوره و سامانه بازچرخانی جریان می یابد و در نهایت از خروجی تخلیه می شود. مطابق با نتایج نشان داده شد که استفاده از این سیستم باعث کاهش گرمای خروجی و افزایش دمای داخل کوره می شود. با افزایش گرمای خروجی از ۵ به ۸۸ درصد، برای احتراق شعله، دمای بیشینه کمی از ۲۱۹۷ کلوین کاهش یافته و به مقدار ۱۹۷۰ کلوین می رسد. در حالی که دمای متوسط به طور قابل توجهی کاهش یافته و از ۱۹۷۵ به ۱۰۹۳ کلوین می رسد. در مقابل، برای احتراق بدون شعله با سیستم چرخش داخلی، دمای بیشینه و دمای متوسط با افزایش گرمای خروجی تقریباً به طور خطی کاهش می یابند. برای مقدار ثابت گرمای خروجی، دمای بیشینه در احتراق شعله به مراتب بالاتر از احتراق بدون شعله با و بدون سیستم چرخش داخلی است. علاوه بر این، برای مقدار ثابت گرمای خروجی، وقتی از سیستم چرخش داخلی استفاده می شود، دمای بیشینه و دمای متوسط هر دو بزرگ تر از حالت بدون سیستم چرخش داخلی هستند. روش پیشنهادی قرار دادن سیستم چرخش داخلی در کوره برای کاربرد عملی احتراق بدون شعله در دیگ های بخار صنعتی یا آب گرم ضروری است. در غیر این صورت، مشابه مورد حاضر بدون سیستم چرخش داخلی، احتراق بدون شعله نمی تواند به دلیل استخراج بیش از حد گرما از طریق دیواره فلزی آب خنک کننده دیگ بخار ادامه یابد.

محمد زاده و ضابطیان [۱۲] در سال ۲۰۲۴ از کوره دالی و همکاران [۱۳] در دانشگاه آدلاید ایده گرفته و با تغییراتی در هندسه و همچنین به منظور افزایش نرخ بازچرخانی داخلی محصولات احتراقی و هدایت آن ها به ناحیه داخلی کوره یک سامانه بازچرخانی به کوره اضافه کردند. تأثیر طول این بازو در شش هندسه مختلف بر ضریب بازچرخانی داخلی، یکنواختی توزیع دما و غلظت گونه ها بررسی شد. مشاهده شد که سامانه با طول بازوی ۶۰ میلی متر بهترین توزیع دما و یکنواختی دما و همچنین سامانه با طول بازو ۱۱۲ میلی متر بیشترین مقدار بیشینه حرارت آزاده شده ی محلی را دارد.

با توجه به مطالعات پیشین، با در نظر گرفتن اهمیت توزیع دمای یکنواخت و در نتیجه افزایش بازدهی حرارتی، در این پژوهش، رژیم احتراق بدون شعله با روش مناسب بازچرخانی گازهای احتراقی از طریق ارائه ی یک طرح جدید برای سامانه ی

¹ Eddy Dissipation Concept

بازچرخانی درون کوره مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق با مطالب ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که یک بازچرخانی مناسب و کافی در کوره‌ی احتراق بدون شعله می‌تواند انتشار آلاینده‌ها را کاهش داده و همچنین افزایش بازده حرارتی و کاهش مصرف سوخت را نتیجه دهد. در مطالعات بررسی شده خلأ تحقیقاتی در زمینه‌ی هندسه سامانه بازچرخانی محصولات احتراق وجود دارد. در نتیجه جهت پرداختن به خلأ تحقیقاتی، در این پژوهش شش طرح هندسی با زوایای مؤثر بازوی سامانه طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند.

فیزیک مسئله

شکل ۱ طرح واره کوره آزمایشگاهی مورد بررسی در این مقاله را نشان می‌دهد. این کوره بر اساس طرح کوره دالی و همکاران [۱۳] از دانشگاه آدلاید طراحی شده است، اما با تغییراتی از جمله:

- حذف لوله‌های خنک‌کننده U شکل درون محفظه احتراق
- تغییر اندازه محفظه
- حذف جسم ضخیم بین ورودی سوخت و هوا
- انتقال لوله‌های خروجی محصولات احتراقی به انتهای کوره [۱۴]

در این پژوهش، کوره آزمایشگاهی با اعمال تغییراتی در طراحی خود، به‌منظور بهبود عملکرد آن، بهینه‌سازی شد. این تغییرات شامل حذف جسم جداکننده بین ورودی سوخت و هوا و انتقال لوله‌های خروجی محصولات احتراقی به انتهای کوره بود. شکل ۱ طرح‌واره کوره بهینه‌سازی شده را نشان می‌دهد. تغییرات به‌گونه‌ای اعمال شده است که حداکثر بازچرخانی محصولات احتراقی در کوره حاصل شود. هدف از این تغییر ضریب بازچرخانی، یکنواختی دما گاز در بیشتر حجم کوره برای کاربردهای عملیات حرارتی است. این کوره دارای سطح مقطع 250×250 میلی‌متر مربع و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر است. کوره بهینه‌سازی شده از چهار بخش اصلی تشکیل شده است. مشعل شامل یک لوله سوخت مرکزی با قطر ۶ میلی‌متر و چهار لوله هوا با قطر یکسان ۳ میلی‌متر است و لوله‌های خروجی با قطر ۲۶ میلی‌متر در انتهای کوره قرار دارند. سامانه بازچرخانی داخلی محصولات احتراقی در کوره، به‌منظور افزایش نرخ بازچرخانی آن‌ها، کوره را به دو بخش داخلی و خارجی تقسیم کرده است. بخش داخلی محل انجام واکنش‌های احتراقی و بخش خارجی محل هدایت محصولات احتراقی به سمت لوله‌های خروجی است.

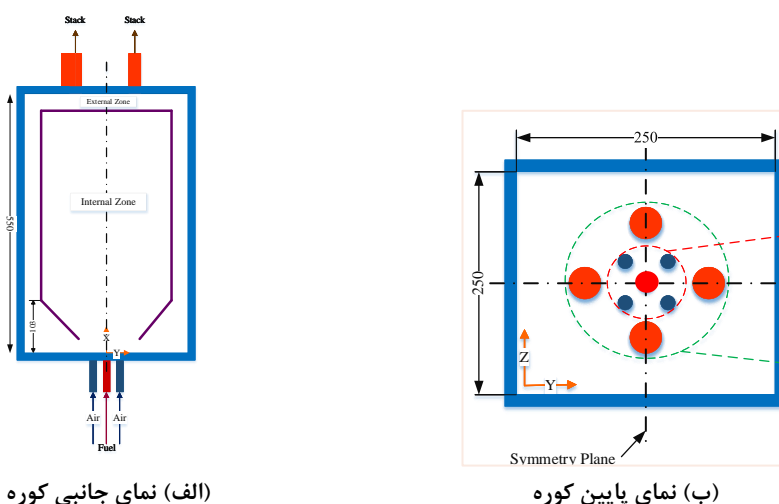


Figure 1- Schematic of the flameless furnace (a) Side view of the furnace (b) Bottom view of the furnace

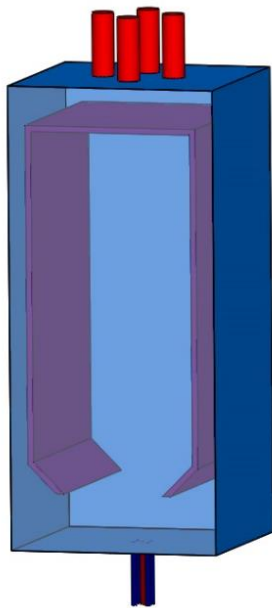
شکل ۱- طرح‌واره کوره‌ی بدون شعله (الف) نمای جانبی کوره (ب) نمای پایین کوره

با توجه به کمبود مطالعات در این زمینه، در این پژوهش، سامانه بازچرخانی طراحی و ساخته شد تا ضریب بازچرخانی محصولات احتراقی در کوره افزایش یابد. با ایجاد بازچرخانی مناسب، توزیع یکنواختی از دما داخل کوره می توان ایجاد کرد که سبب کاهش آلاینده‌ی ناکس و همچنین بهبود کیفیت محصولات احتراقی شود. همچنین هزینه‌های مربوط برای پیش گرمایش هوای ورودی به کوره را نیز کاهش داد. با توجه به وجود خلأ تحقیقاتی در حوزه‌ی روش‌های افزایش ضریب بازچرخانی داخلی، طراحی سامانه‌ها و تأثیر هندسه‌های مختلف بر آن، در این مطالعه از یک سامانه‌ی بازچرخانی جهت افزایش ضریب بازچرخانی محصولات احتراقی درون کوره استفاده شد. شکل ۲، طراحی سامانه بازچرخانی کوره مطالعه‌ی حاضر را به تصویر می کشد. ضخامت تیغه هدایتگر جریان برابر با ۷ میلی‌متر، طول آن ۴۰۱ میلی‌متر و ارتفاع آن نیز ۲۵۰ میلی‌متر است. مشخصات شش هندسه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور افزایش نرخ بازچرخانی داخلی محصولات احتراقی و هدایت آن‌ها به ناحیه داخلی کوره، یک بازو به سامانه اضافه شد. تأثیر زاویه این بازو در شش هندسه مختلف بر ضریب بازچرخانی داخلی، یکنواختی توزیع دما و غلظت گونه‌ها بررسی شد. برای نخستین بار محمد زاده و ضابطیان [۱۲] سامانه بازچرخانی فوق را در این کوره مورد استفاده قرار دادند. جهت بررسی افزایش ضریب بازچرخانی و همچنین افزایش حجم ناحیه‌ی احتراق بدون شعله، پژوهش حاضر به تکمیل مطالعات در این زمینه می پردازد.

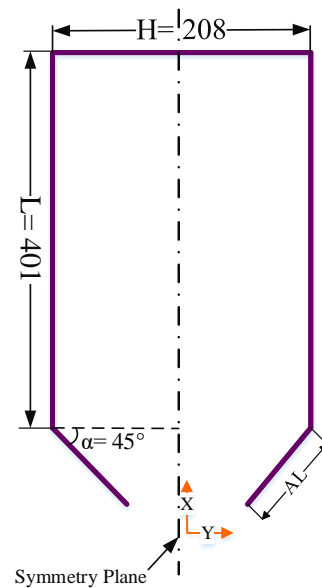
جدول ۱- مشخصات هندسه‌های پیشنهادی سامانه‌ی بازچرخانی

Table 1- Specifications of the proposed recycling system geometries

Geometry number	1	2	3	4	5	6
Arm angle (degree)	15	30	45	60	75	90



(ب) کوره‌ی بدون شعله با سامانه



(الف) سامانه‌ی بازچرخانی داخلی

Figure 2- Schematic (a) Internal recirculation system (b) Flameless furnace with system

شکل ۲- طرح‌واره (الف) سامانه‌ی بازچرخانی داخلی (ب) کوره‌ی بدون شعله با سامانه

شرایط مرزی

شرایط مرزی در مسئله در شکل ۳ به صورت طرح‌واره نشان داده شده‌است. دیوار کوره، شرط مرزی دیوار با دمای ثابت ۱۵۲۰ کلوین را داراست. در صورتی که در واقعیت از عایق‌بندی مناسبی در دیواره کوره استفاده شود تا حدی می‌توان این فرض را مناسب در نظر گرفت. شرط ورودی سرعت و ورودی و شرط خروجی فشار خروجی است. همچنین دیواره‌های نازل‌ها دارای شرط بی‌دررو هستند. در مطالعه حاضر، دو نوع تقارن فیزیکی و هندسی در نظر گرفته شده است. محفظه احتراق در دو صفحه عمود بر هم دارای تقارن هندسی است. با توجه به ورود سوخت و هوا به صورت جت، می‌توان جریان ثانویه در کوره را نادیده گرفت و ورود جریان را در صفحه مرکزی کوره به صورت محوری در نظر گرفت. بنابراین، برای این مسئله، تقارن فیزیکی نیز فرض شده است. در نتیجه، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، می‌توان یک چهارم از کوره را به‌عنوان دامنه حل محاسباتی در نظر گرفت تا هزینه‌ها و زمان حل محاسبات کاهش یابد.

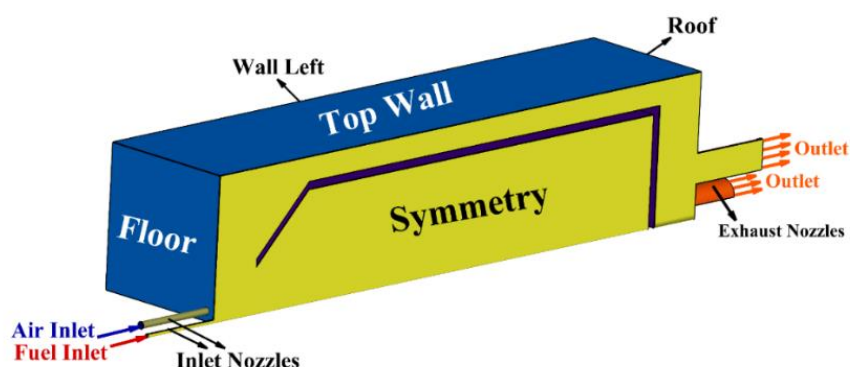


Figure 3- Schematic of boundary conditions on the problem

شکل ۳- طرح‌واره شرایط مرزی مسئله

کوره مورد مطالعه، توانی بین ۹ تا ۲۰ کیلووات و نسبت هم‌ارزی بین ۰/۶ تا ۱/۲ را داراست. با توجه به هزینه و زمان بالای محاسبات، نقطه کاری با توان ۱۰ کیلووات و نسبت هم‌ارزی ۰/۸۵ برای شش سامانه بازچرخانی، شبیه‌سازی شد. مقادیر انتخابی نسبت هم‌ارزی و درصد هوای اضافه بنابر پژوهش‌های مشابه پیشین و مطابق با مطالعات شانتا و همکاران [۱۵] و کائو و همکاران [۱۴] است. در این پژوهش، سوخت و هوا به ترتیب با دبی‌های ۰/۱۸۹ و ۰/۳۷۸ گرم بر ثانیه وارد کوره می‌شود. هوا بدون پیش‌گرمایش و همچنین، سوخت با دمای ۳۰۶ کلوین وارد کوره می‌شود. جدول ۲، شرایط عملکردی شبیه‌سازی کوره را نشان می‌دهد.

جدول ۲- شرایط عملکردی کوره‌ی بدون شعله با سامانه‌ی بازچرخانی برای توان ۱۰ کیلووات

Table 2- Functional conditions of flameless furnace with recirculation system for 10 kW power

Variable	unit	air	fuel
Compounds	Vol%	$O_2 = 21$ & $N_2 = 79$	$CH_4 = 100$
Temperature	K	306	306
flow	g/s	0.378	0.189
Excess air percentage	(%)	25	-

انتخاب روش‌های شبیه‌سازی

برای پیش‌بینی احتراق بدون شعله در یک کوره آزمایشگاهی، نیاز به مدل‌سازی آشفته‌گی، احتراقی و انتقال حرارت تشعشعی است. پیش‌بینی دقیق آشفته‌گی جریان در مدل‌سازی احتراق بسیار مهم است، زیرا بر میدان جریان و آشفته‌گی-شیمی جریان

تأثير زيادي دارد. براي حل آشفته‌گي جريان، از مدل‌هاي $k-\epsilon$ و $k-\omega$ استفاده مي‌شود. مدل $k-\omega$ متغيرها را به‌طور مستقيم در نزديكي ديواره محاسبه مي‌کند، بنابراين نيازمند شبکه‌اي ريزتر و سنگين‌تر در نزديكي ديواره است. مدل $k-\epsilon$ نيز يک تقريب نيمه تجربي است که بر اساس حل معادلات انتقال انرژی جنبشي آشفته‌گي (k) و نرخ اضمحلال (ϵ) آن است. نتايج مطالعات کريستو و دالي [۱۴] نشان مي‌دهد $k-\epsilon$ استاندارد با اصلاح ضريب $C_{\epsilon 1}$ از $1/44$ به مقدار $1/6$ ، نسبت به مدل $k-\epsilon$ Realizable با نتايج تجربي انطباق بيشتري دارد. بنابراين، براي مدل‌سازي آشفته‌گي جريان، از مدل $k-\epsilon$ استاندارد اصلاح شده استفاده مي‌شود.

مدل احتراقي مفهوم اتلاف گرذابه (EDC) به دليل توانايي در نظر گرفتن برهمکنش آشفته‌گي و واکنشي براي سينتيک شيميايي با واکنش‌هاي جزئي زياد، در پيش‌بيني توزيع دما و گونه‌ها عملکرد مناسبی دارد و همچنين موجب انطباق حداکثري نتايج شبیه‌سازي با نتايج تجربي مي‌شود. در اين مدل، فرض بر آن است که واکنش‌ها در نواحی اضمحلال انرژی آشفته‌گي رخ مي‌دهند [۱۶].

در مطالعه عددي مرداني [۱۷] بر روي مشعل JHC، ثابت مقياس زماني واکنش (C_T) با ثابت نگه‌داشتن ضريب C_{D1} و کاهش ضريب C_{D2} به مقدار 0.893 کاهش يافت. همچنين، مقياس کسر حجمي (C_Y) به مقدار 1 کاهش يافت. اين امر باعث بهبود نتايج شبیه‌سازي احتراقي در اين مدل، به‌ويژه در تعيين مقدار بيشينه دما و گونه‌ها و همچنين ارتفاع شعله شد. کاهش ضرايب C_{D1} و C_{D2} ، نرخ انجام واکنش‌ها را کاهش مي‌دهد و باعث مي‌شود واکنش‌ها در ناحیه‌اي بزرگ‌تري صورت گيرند. بنابراين، به احتراق بدون شعله نزديک‌تر مي‌شود.

در مطالعه دي‌هي و همکاران [۱۸]، بر روي کوره اعتبارسنجي شده، مقادير مختلف براي C_{D1} و C_{D2} مورد بررسي قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که مقدار C_{D1} برابر با 0.1357 و C_{D2} برابر با 0.0737 باعث کاهش ثابت مقياس زماني واکنش به 0.1567 و مقياس کسر حجمي به $1/3161$ شد. اين امر باعث افزايش ناحیه انجام واکنش و کاهش گرمای آزاد شده واکنش شد. در نتيجه، نتايج شبیه‌سازي براي اين کوره بهبود يافت. ضرايب مدل احتراقي EDC مورد استفاده در اين شبیه‌سازي در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳- ضرايب مدل احتراقي EDC مورد استفاده در اين پژوهش

Table 3- The coefficients of the EDC combustion model in this study

Coefficient	The first constant of the EDC model	The second constant of the EDC model	The volume fraction constant	The time constant scale
scientific symbol	C_{D1}	C_{D2}	C_Y	C_T
The default value	0.1340	0.5000	2.1377	0.4083
Corrected value	0.1357	0.0737	1.3161	0.1567

سينتيک شيميايي، که سرعت و جهت واکنش‌هاي شيميايي را تعيين مي‌کند، نقش مهمی در تعيين دما و گونه‌هاي شيميايي در احتراق دارد. در شبیه‌سازي احتراق بدون شعله، از سينتيک‌هاي شيميايي کاهش يافته‌ي DRM19 با 19 گونه و 84 واکنش، DRM22 با 22 گونه و 104 واکنش (به اضافه‌ي نيتروژن و آرگون که گازهاي بي‌اثر هستند) و سينتيک شيميايي کامل GRI3.0 با 53 گونه و 325 واکنش استفاده مي‌شود. در مطالعه‌ي گلتي و همکاران [۱۹]، ميانگين خطاي نسبي در پيش‌بيني دماي ميانگين توسط سينتيک‌هاي شيميايي DRM19 و GRI3.0، در مقايسه با داده‌هاي تجربي، کمتر از 5 درصد به دست آمد. اين نشان مي‌دهد که هر دو سينتيک شيميايي در پيش‌بيني دماي ميانگين احتراق بدون شعله با دقت قابل قبولی عمل مي‌کنند. مطابق با سينتيک شيميايي DRM22 تقريباً تمام واکنش‌هاي مربوط به اکسيداسيون گاز متان، از جمله واکنش‌هاي مربوط به C_2 که براي اکسيداسيون متان مهم است را در نظر مي‌گيرد [۲۰]. در اين تحقيق، ابتدا سينتيک شيميايي

چهار مرحله‌ای جانز و لینستد^۱ [۲۱]، محاسبه شد. این سینتیک شیمیایی ساده حاوی شش گونه‌ی CO ، CO_2 ، CH_4 و CH_4 ، H_2O و H_2 (به اضافه‌ی نیتروژن که گاز بی‌اثر است) و چهار واکنش است.

سینتیک شیمیایی چهار مرحله‌ای جانز و لینستد، گونه‌های میانی مهمی مانند رادیکال OH و مسیره‌های اکسیداسیون متان را در نظر نمی‌گیرد. از آنجایی که حل سینتیک شیمیایی GRI3.0 هزینه‌های محاسباتی بالایی دارد، پس از همگرایی حل سینتیک شیمیایی چهار مرحله‌ای، سینتیک شیمیایی کاهش‌یافته‌ی DRM22 فعال شد. این سینتیک شیمیایی نیز مسیره‌های مربوط به تشکیل ناکس را در نظر نمی‌گیرد، اما با استفاده از پس‌پردازش، می‌تواند ناکس را با درصدی خطا پیش‌بینی کند. از آنجایی که هدف تحلیل کیفیت احتراق بدون شعله است و نیازی به مسیر تشکیل ناکس نیست، با بررسی نتایج دمایی، حرارت آزاد شده و همچنین ضریب بازچرخانی برای مکانیسم DRM22 و مقایسه آن با نتایج حاصل از مکانیسم جزئی، تغییرات زیادی مشاهده نشد. بنابراین سینتیک شیمیایی DRM22 در شبیه‌سازی احتراق در نظر گرفته شد.

در کوره‌ی احتراق بدون شعله، دمای گازها بالا است و محصولات احتراقی مانند بخار آب و دی‌اکسید کربن دارای ضریب جذب و نشر بالایی هستند. بنابراین، انتقال حرارت تشعشعی در این کوره‌ها نقش مهمی دارد. برای مدل‌سازی انتقال حرارت تشعشعی، از مدل‌های عددی مختلفی استفاده می‌شود. دو مدل P1 و جهات گسسته، کاربرد بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها دارند. در مدل P1، معادله‌ی انتقال تشعشع به صورت یک معادله‌ی دیفیوژن بیان می‌شود. این معادله، انتقال انرژی تابشی را در یک محیط همگن با ضریب جذب و نشر ثابت توصیف می‌کند [۲۲، ۲۳].

در مطالعه‌ی حاضر، برای مدل‌سازی انتقال حرارت تشعشعی، از مدل DO استفاده شد. مدل DO یک مدل دقیق‌تر از مدل P1 است که برای محیط‌هایی با ضخامت نوری کمتر از ۱، مانند احتراق، مناسب‌تر است. در مدل DO، معادله‌ی انتقال تشعشع به مختصات کروی منتقل می‌شود و برای هر پرتو تشعشعی در هر جهت، یک معادله‌ی انتقال حل می‌شود. تعداد پرتوهای تشعشعی در مدل‌سازی سه‌بعدی با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود. در این رابطه، N_θ و N_ϕ تعداد تقسیمات در راستای θ و ϕ در مختصات کروی هستند و همچنین عدد ۸ نشان‌دهنده‌ی حداقل تقسیمات کره است که هر نیم‌کره به ۴ قسمت تقسیم می‌شود. چینش $8 \times 2 \times 2$ نسبت به چینش $8 \times 3 \times 3$ حدود ۸۰ کلون اختلاف دمایی داشت که خطای بالایی است. با مقایسه‌ی چینش $8 \times 3 \times 3$ و $8 \times 4 \times 4$ ، اختلاف دمای ۱۳ کلونی مشاهده شد که در نتیجه برای افزایش ران تایم در این مطالعه، مدل تشعشعی DO با چینش $8 \times 3 \times 3$ فعال شد. ضریب جذب نیز ثابت در نظر گرفته نشد و از روش مجموع وزنی گازهای خاکستری محاسبه شد [۲۴].

$$8 \times N_\theta \times N_\phi = \text{تعداد پرتوهای تشعشعی در مدل‌سازی سه‌بعدی} \quad (2)$$

در این مطالعه، حرکت سیال درون کوره به صورت غیرقابل تراکم و پایا در نظر گرفته شد. بنابراین، از حل گر پایه‌ی فشار برای حل معادلات حاکم استفاده شد. این معادلات می‌توانند با استفاده از الگوریتم‌های عددی پیوسته^۲ یا مجزا^۳ حل شوند. الگوریتم‌های عددی پیوسته، معادلات تکانه و پیوستگی به طور هم‌زمان حل می‌شوند. این امر موجب افزایش سرعت همگرایی این الگوریتم‌ها نسبت به الگوریتم‌های مجزا می‌شود. با توجه به اینکه در این مطالعه جریان احتراقی درون کوره به صورت پایا حل شد، الگوریتم SIMPLE برای کوپلینگ سرعت-فشار استفاده و همچنین مقدار باقیمانده 10^{-6} برای همگرایی معادلات در نظر گرفته شد.

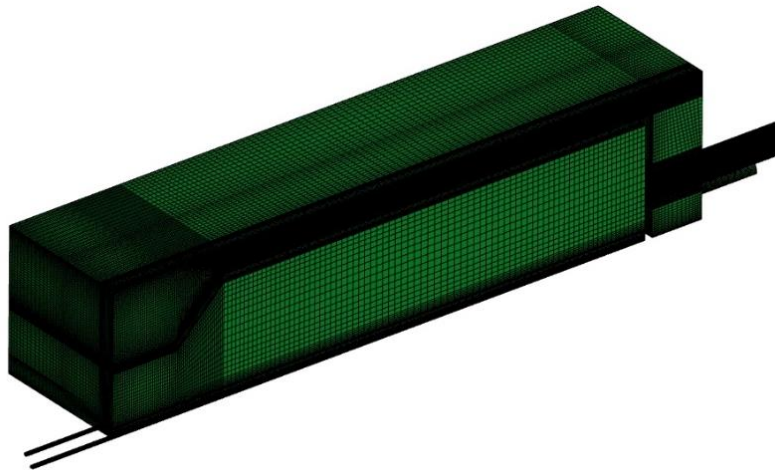
¹ Jones and Lindstedt

² Couple Algorithm

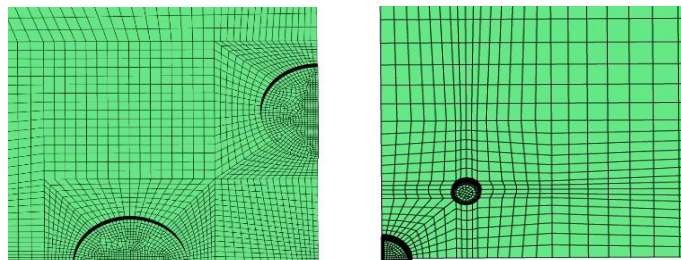
³ Segregated Algorithm

استقلال از شبکه

هندسه کوره با استفاده از نرم افزار اسپیس کلیم^۱ طراحی و شبکه دامنه حل کوره در نرم افزار انسیس مشینگ^۲ به صورت شبکه سازمان یافته مستطیلی تولید شد. دلیل استفاده از نرم افزار اسپیس کلیم کنترل بیشتر بر تقسیم هندسه به بخش های مختلف جهت شبکه بندی مناسب است. این شبکه، پارامترهای احتراقی، اغتشاشی و تشعشعی را با دقت بالاتر و با صرف هزینه و زمان کمتری نسبت به شبکه بی سازمان محاسبه می کند با توجه به تفاوت گرادیان ها در نواحی مختلف کوره و نیاز به شبکه بندی های متفاوت، کوره به ۷۹ قسمت تقسیم شد. شکل ۴ شبکه بندی کوره در نواحی مختلف را نشان می دهد.



(الف) شبکه بندی میدان محاسباتی کوره ی احتراق بدون شعله



(ب) شبکه بندی ورودی سوخت و هوا و خروجی محصولات احتراقی

Figure 4- meshing

(a) computational field of flameless combustion furnace (b) fuel and air input and output of combustion products

شکل ۴- شبکه بندی (الف) میدان محاسباتی کوره احتراق بدون شعله (ب) ورودی سوخت و هوا و خروجی محصولات احتراقی

به منظور بررسی استقلال شبکه حل، سه شبکه با تعداد سلول های ۱، ۰/۵۹ و ۰/۳۱ میلیون سلول تولید شدند. توزیع دما و گونه اکسیژن در سه مقطع ۱۳۵، ۲۲۵ و ۴۰۵ میلی متری برای تعیین استقلال شبکه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی در شکل ۵ نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود، نتایج مربوط به شبکه بندی با تعداد ۱ و ۰/۵۹ میلیون سلول، اختلافی کمتر از ۰/۱ درصد با یکدیگر دارند. این اختلاف، در مقایسه با اختلاف ۰/۵۹ میلیون سلول با ۰/۳۱

1 Spaceclaim
2 Ansys Meshing

میلیون سلول، بسیار کم است. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که نتایج مربوط به شبکه بندی با تعداد ۰/۵۹ میلیون سلول، مستقل از تعداد شبکه است.

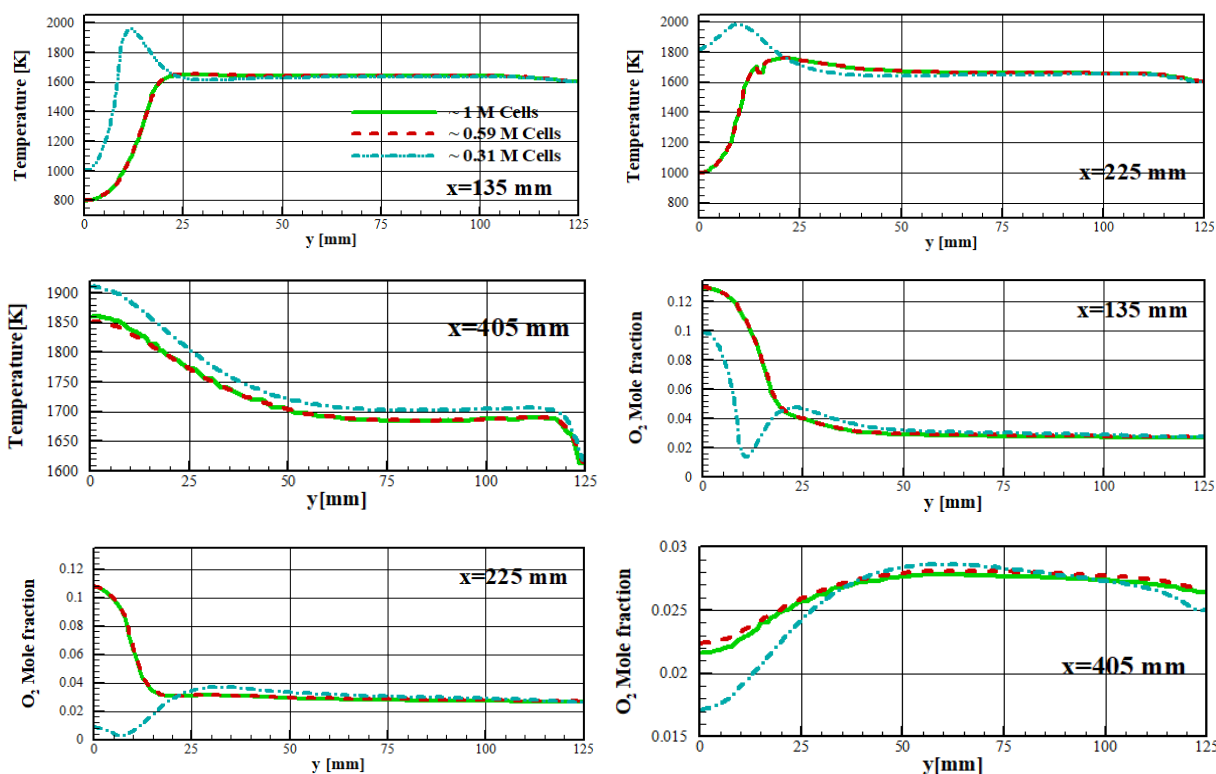


Figure 5- Temperature and oxygen distribution diagram in three sections of 135, 225 and 405 mm to check independence from the mesh

شکل ۵- نمودار توزیع دما و اکسیژن در سه مقطع ۱۳۵، ۲۲۵ و ۴۰۵ میلی متری جهت بررسی استقلال از شبکه

اعتبارسنجی

در این پژوهش، برای شبیه سازی احتراق بدون شعله از یک کوره مکعبی شکل با طول و مقطع به ترتیب ۵۵۰ و ۲۵۰×۲۵۰ میلی متر استفاده شد. این کوره معروف به کوره ی کائو و همکاران [۱۳] است که در شکل ۶، طرحواره کوره و مشعل آورده شده است. درگاه های اندازه گیری دما و گونه های (O_2 و CO و NO) در هر ۲۵ میلی متر از دیواره جانبی کوره تا خط مرکزی در پنج مقطع با فواصل ۱۳۵، ۲۲۵، ۳۱۵، ۴۰۵ و ۴۹۵ میلی متر قرار دارند. با توجه به تقارن فیزیکی و هندسی مسئله، شرط مرزی تقارن اعمال شد و فقط یک چهارم کل کوره شبیه سازی شد. دیوار کوره، شرط مرزی دیوار با دمای ثابت ۱۵۲۰ کلوین را داشت. شرایط شبیه سازی کوره در جدول ۴ آورده شده است. ظرفیت حرارتی کوره ۹/۵ کیلووات و نسبت هم آرزوی آن ۰/۷ بوده و هوا و سوخت در دمای ۳۰۶ کلوین و با ۲۵ درصد هوای اضافی وارد کوره می شوند. سرعت هوا و سوخت در خروجی مشعل به ترتیب ۲۲/۳۸ و ۹/۳۲ متر بر ثانیه است.

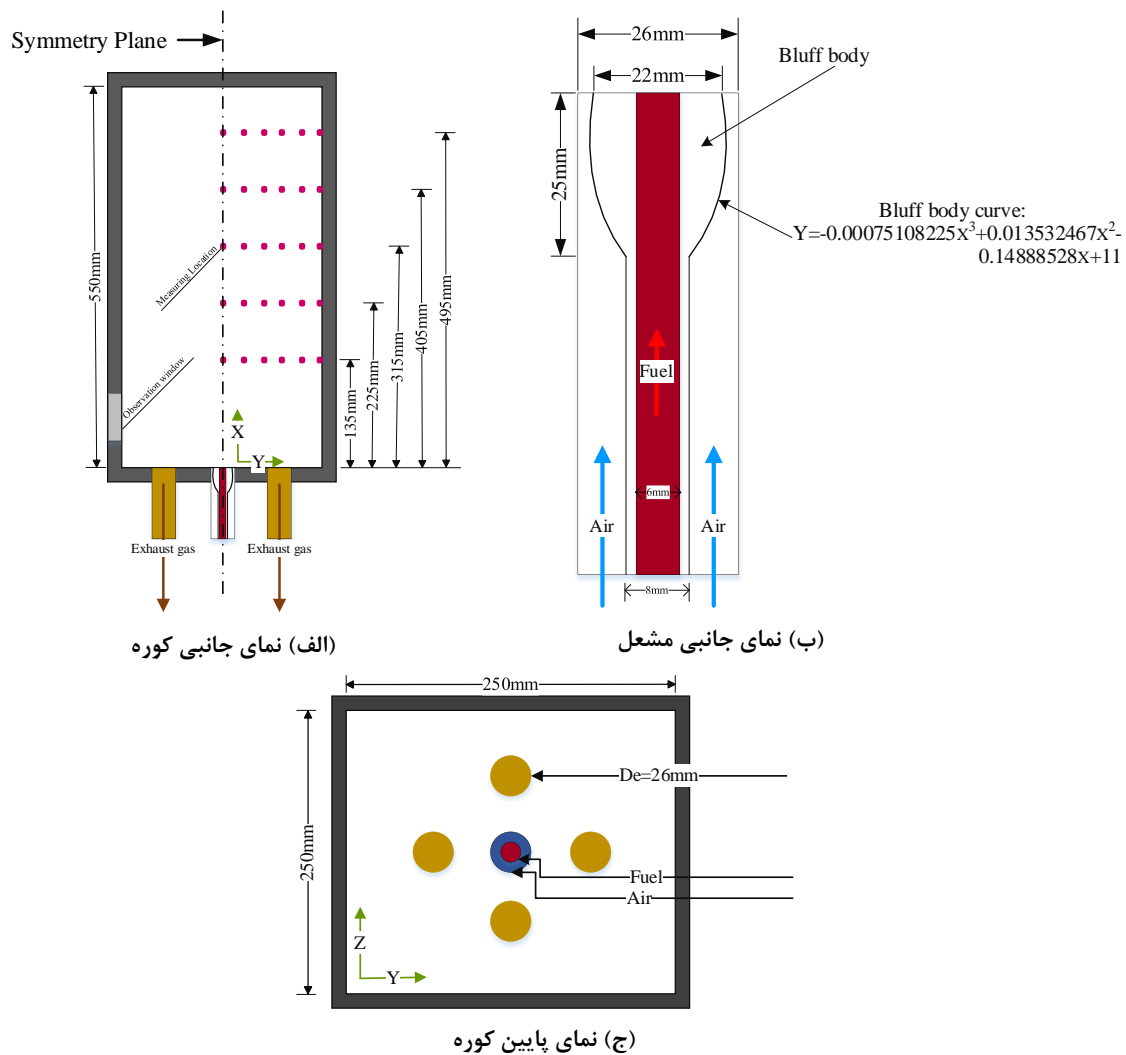


Figure 6- Furnace schematic (a) Furnace side view (b) Burner side view (c) Furnace bottom view [13]

شکل ۶- طرح واره کوره (الف) نمای جانبی کوره (ب) نمای جانبی مشعل (ج) نمای پایین کوره [۱۳]

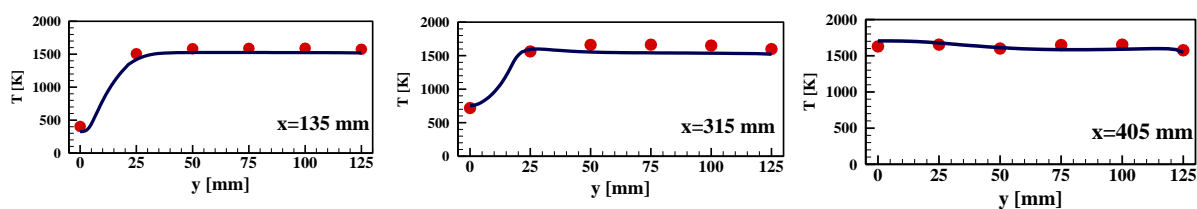
جدول ۴- شرایط شبیه سازی کوره ی بدون شعله جهت اعتبارسنجی [۱۳]

Table 4- Simulation conditions of a flameless furnace for validation [13]

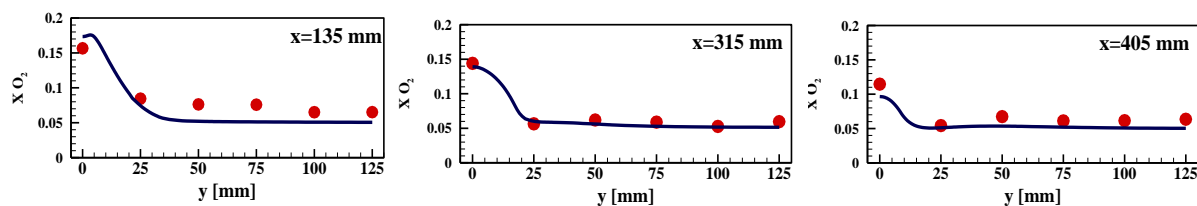
Variable	unit	air	fuel
Compounds	Vol%	$O_2 = 21$ & $N_2 = 79$	$CH_4 = 99.5$ $N_2 = 0.5$
Temperature	K	306	306
velocity	m/s	22.8	9.32
Excess air percentage	(%)	25	-

در شکل ۷، نتایج شبیه سازی دما و برخی گونه های شیمیایی (اکسیژن و اکسید نیتروژن) با نتایج آزمایشات تجربی کائو و همکاران [۱۳] به صورت کمی اعتبارسنجی شده اند. نتایج نشان می دهند که توزیع دمای شبیه سازی شده با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد و میانگین خطای نسبی پیش بینی دما ۴/۷۷ درصد است. بیشترین خطای نسبی ۸/۲۱ درصد، در صفحه مرکزی و مقطع ۴۰۵ میلی متر مشاهده شده است که دما در این نقطه ۹۳/۸۴ کلوین بیشتر از داده تجربی پیش بینی شده است. تغییرات دما در راستای عرضی کوره بسیار ناچیز است و نشان دهنده توزیع یکنواخت دما در این راستای است. در شکل

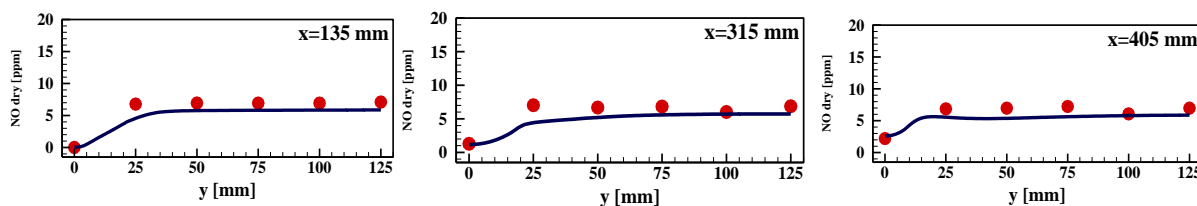
۷ نیز، نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی کسر مولی گونه‌ی اکسیژن (O_2) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. میانگین خطای نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای کسر مولی اکسیژن، ۱۴/۱۴ درصد است. این امر نشان‌دهنده‌ی تطابق قابل قبولی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی است. در مقطع ۱۳۵ میلی‌متری، مقدار اکسیژن پیش‌بینی شده ۰/۰۱ کسر مولی کمتر از داده‌ی تجربی (۰/۰۶۵) است. این امر موجب ایجاد خطای نسبی ۲۸/۱ درصد شده است. همچنین در شکل ۷، توزیع مقادیر خشک NO در مقایسه با داده‌های تجربی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در برخی نقاط اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی وجود دارد. این امر می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد، از جمله خطاهای اندازه‌گیری که می‌تواند شامل دقت دستگاه اندازه‌گیری یا کاربر باشد، یا نحوه حل معادلات RANS باشد. در حالت دوم، ممکن است قله NO در نمودار شبیه‌سازی به‌خوبی قابل مشاهده نباشد.



الف) توزیع دما



ب) توزیع کسر مولی اکسیژن



ج) توزیع مقادیر خشک اکسید نیتروژن

Figure 7- Comparison of temperature and species prediction results (O_2 و NO) with the experimental data of Cao et al.[13]

شکل ۷ - مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی (—) دما و گونه‌ها (O_2 و NO) با داده‌های تجربی (●) و همکاران [۱۳]

نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی کوره‌ی احتراق بدون شعله با قرارگیری سامانه‌ی بازچرخانی درون آن و تغییر زاویه‌ی بازوی اضافه شده به سامانه ارائه شده است. در شبیه‌سازی از نرم‌افزار Ansys Fluent 2022 R2 استفاده شده است. تأثیر تغییر زاویه‌ی بازو با زاویه‌های مختلف به ازای شش هندسه‌ی پیشنهادی بر میدان جریان، توزیع دما و یکنواختی آن و همچنین توزیع گونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

میدان جریان

میدان جریان و توزیع سرعت در کوره، تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای احتراق دارد. خط‌های جریان^۱ سه‌بعدی سرعت برای هندسه با زاویه بازو ۶۰ درجه در شکل ۸ قابل مشاهده است. همچنین شکل ۸، توزیع میدان سرعت و فشار در صفحه x-y را برای شش طرح پیشنهادی سامانه بازچرخانی داخلی نشان می‌دهد. در هر هندسه، دو ناحیه بازچرخانی در میانه و انتهای کوره تشکیل می‌شود. به دلیل وقوع واکنش‌ها در میانه کوره و تولید محصولات احتراقی و همچنین تأثیر بیشتر ورودی در این ناحیه، طول ناحیه بازچرخانی در وسط کوره بیشتر از ناحیه بالایی آن است. ناحیه‌ی بازچرخانی میانی در ارتفاع ۱۰۰ تا حدود ۳۰۰ میلی‌متر (در هر هندسه طول این ناحیه متفاوت است) و ناحیه بازچرخانی انتهای کوره در ارتفاع حدود ۳۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر تشکیل شده است. علاوه بر این دو ناحیه، جریان در پشت بازو و خارج از سامانه نیز دچار بازچرخش می‌شود که این ناحیه‌ی چرخشی تأثیری بر نرخ بازچرخانی ندارد؛ چراکه در خارج از ناحیه‌ی داخلی سامانه صورت گرفته است. در هندسه‌ی ۱ با زاویه‌ی بازوی ۱۵ درجه، طول ناحیه بازچرخانی در وسط کوره تا حدود ۲۳۰ میلی‌متر کشیده می‌شود. طول این ناحیه برای ۲ هندسه‌ی ۳۰ و ۴۵ درجه تا حدود ۲۸۰ میلی‌متر ادامه می‌یابد. در ادامه با افزایش زاویه‌ی بازو بخش زیادی از جریان به سمت خروجی شارش یافته و ناحیه‌ی بازچرخانی میانی شدت و آشفتگی خود را از دست می‌دهد. در هندسه‌ی ۷۵ و بدون بازو این شرایط مشاهده می‌شود. در زاویه‌های کمتر مسیر خروج گازهای احتراقی محدودتر می‌شود و همین سرعت بالای مخلوط ورودی، باعث هدایت جریان خروجی به داخل کوره می‌شود. توزیع فشار در شکل ۹ نشان‌دهنده افزایش فشار درون سامانه و اختلاف فشار درون و بیرون آن با افزایش زاویه بازو است. این امر موجب شتاب‌گیری محصولات احتراقی به سمت خروجی و کاهش طول ناحیه بازچرخانی می‌شود.

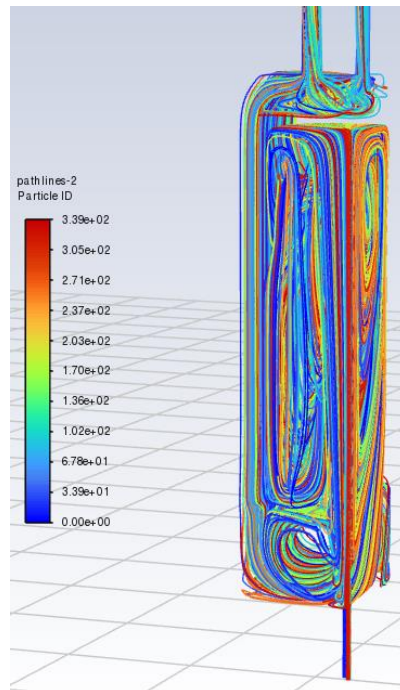


Figure 8- 3D velocity streamlines for 60 degree arm angle geometry

شکل ۸- خط‌های جریان سه‌بعدی سرعت برای هندسه با زاویه بازو ۶۰ درجه

^۱ Streamline

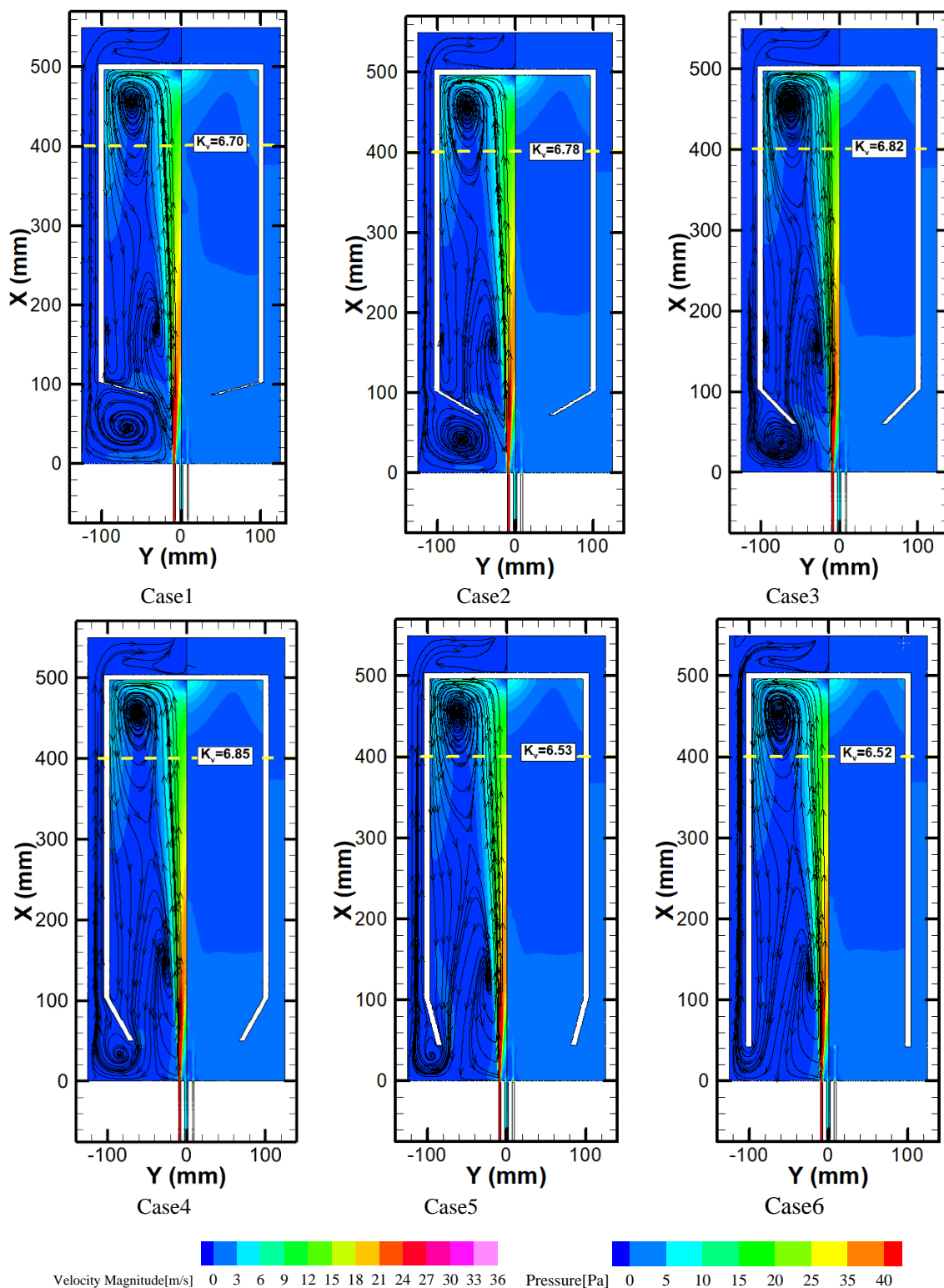


Figure 9- Velocity and pressure field distribution in the x-y plane for six proposed internal recirculation system designs

شکل ۹- سمت چپ توزیع میدان سرعت و سمت راست فشار در صفحه X-Y به ازای شش طرح پیشنهادی سامانه‌ی بازچرخانی داخلی

مقدار کمی نرخ بازچرخشی درون کوره، ضریب بازچرخانی داخلی (K_v) از معادلات (۳) و (۴) که توسط وونینگ و وونینگ [۲۵] پیشنهاد شده، محاسبه می‌شود.

$$K_v = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_{in}} = \frac{\dot{m}_{up} - (\dot{m}_a + \dot{m}_f)}{\dot{m}_a + \dot{m}_f} \quad (3)$$

در معادله (۳)، \dot{m}_{up} ، دبی جرمی جریانی است که در راستای جهت جریان درون کوره شارش دارد. برای محاسبه \dot{m}_{up} از معادله (۴) استفاده شده است.

$$\dot{m}_{up} = \iint \rho \times V_x \times dA \quad , \quad V_x > 0 \quad (4)$$

نمودار توزیع ضریب بازچرخشی داخلی (K_v) به ازای شش طرح پیشنهادی سامانه‌ی بازچرخانی داخلی در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. در هر هندسه، ضریب بازچرخانی در جهت جریان افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به انتهای سامانه کاهش می‌یابد. بررسی شکل ۹ نیز نشان می‌دهد که اندازه بردار سرعت در انتهای کوره بیشتر از وسط و ابتدای آن (بدون در نظر گرفتن لوله‌های ورودی) است. این امر موجب افزایش مقدار کمی ضریب بازچرخانی در راستای جریان می‌شود. با بررسی نتیجه می‌شود، نرخ بازچرخانی با شیب زیادی از مقدار ۱/۱۴ برای هندسه ۱ با زاویه بازو ۱۵ درجه در فاصله ۴۶/۵ میلی‌متر تا مقدار ۴/۰۴ در فاصله ۱۶۰ میلی‌متر تغییر می‌کند. در هندسه ۲ با زاویه ۳۰ درجه این مقدار در این بازه طولی افزایش پیدا کرده و برای هندسه ۶ که حالت بدون بازو است، دارای بیشترین مقدار برابر ۴/۳ است. از فاصله ۱۶۰ به بعد شیب تغییرات کمتر شده و همچنین رفتار هندسه‌ها تغییر می‌کند. در فاصله ۲۵۰ تا ۴۳۰ میلی‌متری بیشترین مقدار ضریب بازچرخانی را به ترتیب هندسه‌های ۴ و ۳ دارند. با مقایسه‌ی مقدار ضریب بازچرخانی در کل کوره مشاهده می‌شود که تغییر زاویه‌ی بازو در تغییرات مقدار این ضریب تأثیر قابل توجهی ندارد و تأثیر اصلی آن به روی طول ناحیه‌ی بازچرخانی است که منجر به تغییرات یکنواختی دما و حرارت آزاد شده می‌شود.

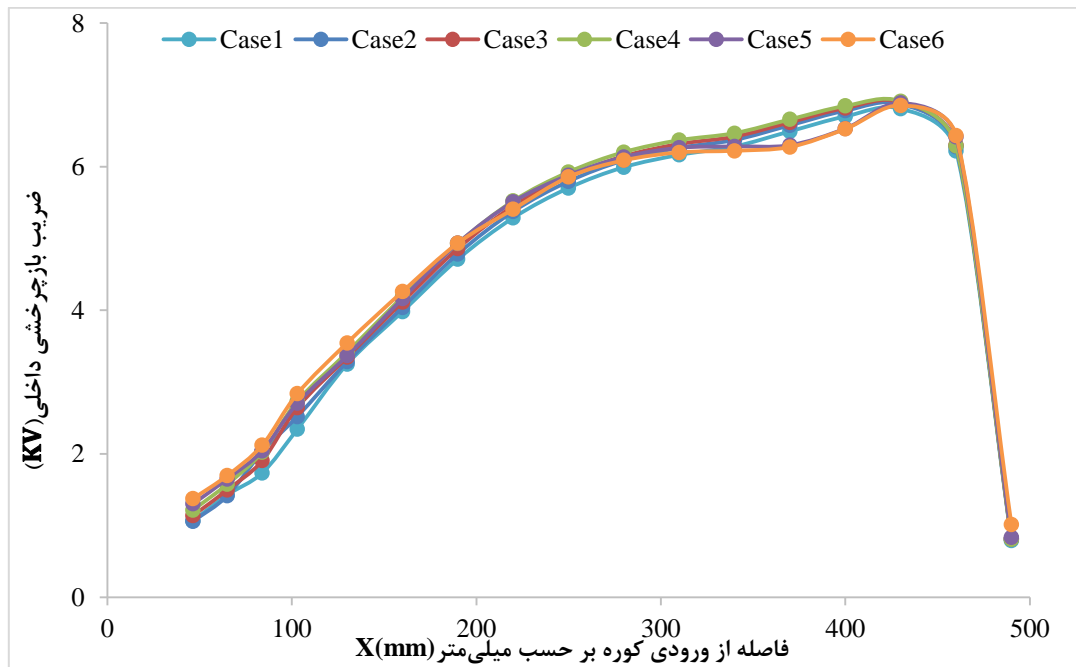


Figure 10- Distribution chart of internal recycling coefficient (K_v) for six proposed designs of internal recycling system

شکل ۱۰- نمودار توزیع ضریب بازچرخشی داخلی (K_v) به ازای شش طرح پیشنهادی سامانه‌ی بازچرخانی داخلی

برای کوره‌ی مشابه دانشگاه آدلاید [۱۲]، در مطالعه‌ی لی و همکاران [۲۶]، ضریب بازچرخشی در فاصله ۴۰۰ میلی‌متری، مقدار $K_V = ۲/۵۸$ محاسبه شده است. درصد تغییرات ضریب بازچرخشی در طرح‌های پیشنهادی نسبت به مطالعه‌ی لی و همکاران از معادله‌ی (۵) محاسبه شده و در جدول ۵ آورده شده است.

$$\% \Delta K_V = \left(\frac{K_{Vi} - 2.58}{2.58} \right) \times 100 \quad (۵)$$

جدول ۵- درصد افزایش یا کاهش ضریب بازچرخشی در شش طرح پیشنهادی نسبت به مطالعه‌ی لی و همکاران [۲۶]

Table 5- The percentage of increase or decrease of recycling coefficient in six proposed designs compared to the study of Lee et al. [26]

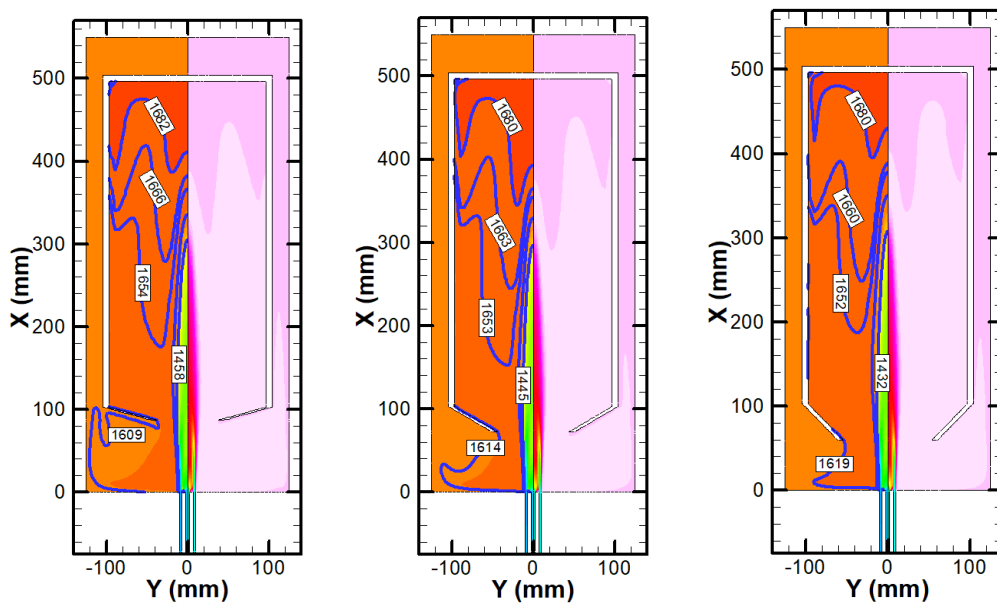
The geometry	1	2	3	4	5	6
$\% \Delta K_V$	159.69	162.79	164.34	165.50	153.10	152.71

در تمامی هندسه‌ها ضریب بازچرخانی حداقل ۱/۵ برابر نسبت به کوره‌ی مشابه افزایش پیدا کرده است. بیشترین افزایش برای هندسه‌ی چهارم با مقدار افزایش ۱۶۵/۵۰ درصدی و کمترین مقدار افزایش در هندسه‌ی ۶ با مقدار افزایش ۱۵۲/۷۱ درصدی است. درصد افزایش این ضریب در هندسه سه با زاویه بازو ۴۵ درجه دارای مقدار ۱۶۴/۳۴ است که در مقایسه با هندسه مشابه در پژوهش محمد زاده [۱۲] با درصد افزایش ۱۶/۲۸، افزایش قابل‌توجهی دارد که این امر به دلیل کاهش قطر ورودی هوا از ۶ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر در این پژوهش است.

توزیع دما

یکنواختی دما از رابطه‌ی (۶) محاسبه شده است؛ که \bar{T} دمای متوسط کوره و T_i دمای محلی است [۲۷]. هر چه مقدار TU به ۱ نزدیک‌تر باشد یکنواختی دما بیشتر است که مطلوب پژوهش است. نتایج توزیع دما نیز در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

$$TU = 1 - \left| \frac{T_i - \bar{T}}{\bar{T}} \right| \quad (۶)$$



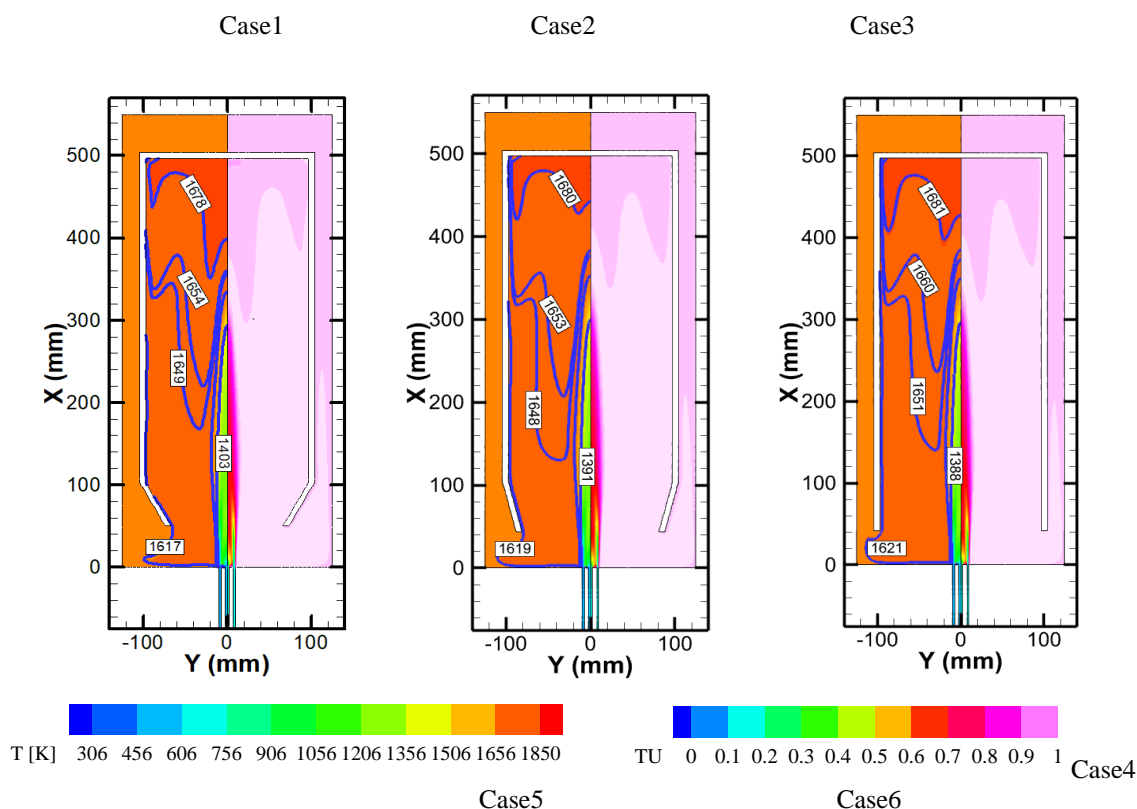


Figure 11- Temperature distribution and its uniformity for six proposed designs of internal recirculation system

شکل ۱۱- سمت چپ توزیع دما و سمت راست یکنواختی آن برای شش طرح پیشنهادی سامانه‌ی باز چرخانی داخلی

با بررسی توزیع دما و یکنواختی آن در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود محدوده‌ی بیشینه‌ی یکنواختی دما در زاویه‌های بازو ۱۵، ۴۵ و ۶۰ درجه بیشتر از ۳ هندسه‌ی دیگر است. نتایج توزیع دما نشان می‌دهد، با کاهش زاویه بازو، دمای بیشینه نیز افزایش یافته است. دلیل این افزایش این است که با بسته‌تر شدن سامانه، محصولات احتراقی درون آن محبوس شده و دمای کوره افزایش می‌یابد.

توزیع حرارت آزاد شده و گونه‌ی OH

در کوره‌های صنعتی، عملیات حرارتی مانند تولید قطعات فولادی و ذوب شیشه انجام می‌شود. در این کوره‌ها، تولید حرارت بیشتر برای افزایش سرعت عملیات حرارتی و کاهش هزینه‌ها مورد اهمیت است. همچنین، انتقال حرارت یکنواخت به محصولات تولیدی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. این امر باعث افزایش کیفیت محصولات تولیدی و کاهش ضایعات می‌شود. در جدول ۶، مقادیر بیشینه حرارت تولید شده و افزایش آن نسبت به هندسه ۶ که حالت بدون بازو است (زاویه ۹۰ درجه) برای شش طرح پیشنهادی آورده شده است. این مقادیر برای یک نقطه خاص در کوره است. درصد افزایش یا کاهش حرارت تولید شده از رابطه (۷) به دست آمده است. در این رابطه، i هندسه موردنظر است. با توجه به نتایج جدول ۷، می‌توان نتیجه گرفت که هندسه‌های ۱، ۲ و ۳ نسبت به هندسه ۶، افزایش حرارت تولید شده بیشتری دارند. این امر نشان می‌دهد که این هندسه‌ها برای تولید حرارت بیشتر در کوره مناسب‌تر هستند. همچنین، هندسه ۴ نیز نسبت به هندسه ۶، افزایش حرارت تولید شده قابل توجهی دارد. این امر نشان می‌دهد که این هندسه نیز برای تولید حرارت بیشتر در کوره مناسب است.

$$\Delta HR_{\max} = \frac{HR_{\max,i} - HR_{\max,1}}{HR_{\max,1}} \quad (7)$$

هندسه با زاویه‌ی ۷۵ درجه، کاهش ۲۰ درصدی مقدار بیشینه حرارت آزاد شده را نسبت به حالت بدون بازو دارد. با کاهش زاویه‌ی بازو و بسته‌تر شدن هندسه تا ۳۰ درجه، مقدار بیشینه حرارت آزاد شده تا ۱/۲۳ افزایش می‌یابد که افزایش ۵۴ درصدی نسبت به حالت بدون بازو دارد. هندسه‌ی ۱ که دارای زاویه‌ی بازوی ۱۵ درجه است، مقدار افزایش ۴۹ درصدی دارد. از آنجایی که پتانسیل انتقال حرارت در کاربردهای صنعتی و کوره‌های عملیاتی مطرح است، از نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت طرح هندسه با زاویه‌ی ۳۰ درجه بازو بهترین هندسه‌ی پیشنهادی برای کاربردهای عملیاتی است.

جدول ۶- مقادیر بیشینه و درصد تغییر بیشینه حرارت آزاد شده نسبت به هندسه‌ی ۱ در شش طرح پیشنهادی

Table 6- The maximum values and percentage of the maximum change of the released heat compared to geometry 1 in the six proposed designs

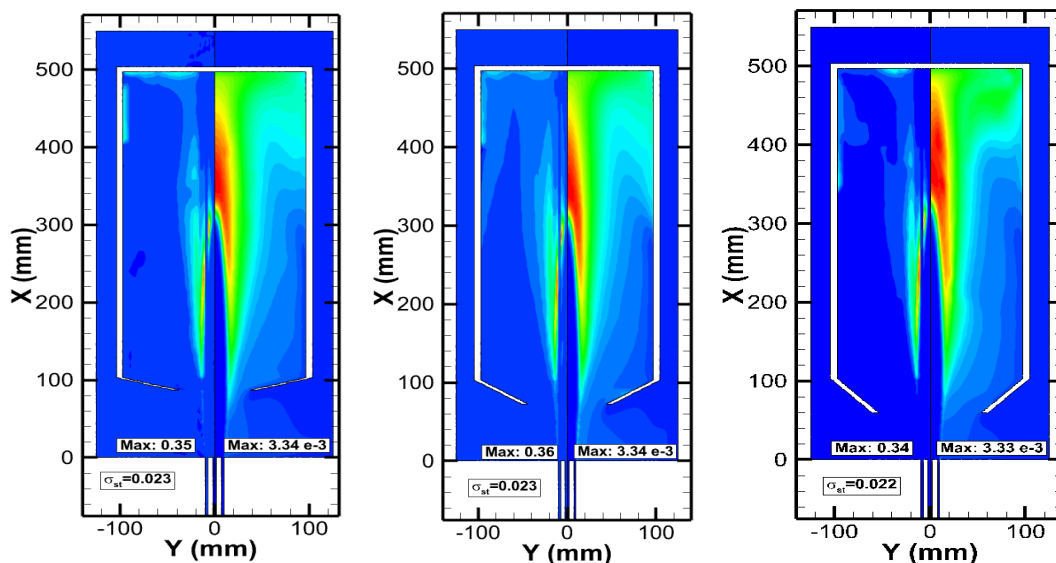
The geometry	1	2	3	4	5	6
HR _{max} (W)	1.19	1.23	1.17	1.16	0.64	0.80
ΔHR _{max} (%)	49	54	46	45	-20	-

در سمت چپ ۰ توزیع حرارت آزاد شده نشان داده شده است. انحراف از معیار استاندارد برای حرارت آزاد شده از رابطه‌ی (۸) محاسبه شده و نشان‌دهنده‌ی انحراف از مقدار میانگین بوده و کمینه بودن این پارامتر، می‌تواند پخش یکنواخت حرارت آزاد شده را نشان دهد. در ۰، مشاهده می‌شود که هندسه‌ی ۱، ۲، ۵ و ۶ دارای انحراف از معیار یکسان با مقدار ۰/۰۲۳ هستند. هندسه‌ی ۴ نیز با انحراف از معیار ۰/۰۱۸ کمترین انحراف از معیار را دارد. می‌توان نتیجه گرفت که در هندسه‌ی ۴ نسبت به سایر هندسه‌ها حرارت یکنواخت‌تر آزاد شده است و در کوره‌های عملیاتی محصولاتی با کیفیت بالاتر تولید می‌کند. باید توجه داشت که تمام هندسه‌های پیشنهادی انحراف از معیار پایین و قابل قبولی دارند.

$$\sigma_{st} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (HRR_i - HRR_{ave})^2}{N}} \quad (8)$$

در سمت راست شکل ۱۲، کسر مولی گونه‌ی OH* نشان داده شده است. کسر مولی OH* می‌تواند معرف مناسبی برای نمایش ناحیه‌ی واکنشی احتراق باشد [۲۸]. همچنین مشاهده می‌شود که در هندسه‌ها محل شروع واکنش در حدود ۲۲۰ تا ۲۴۰ میلی‌متر است. نکته‌ی قابل توجه این است که واکنش در هندسه‌ی ۳ با زاویه‌ی بازوی ۴۵ درجه بیشترین طول ناحیه‌ی واکنش را دارد.

Case2



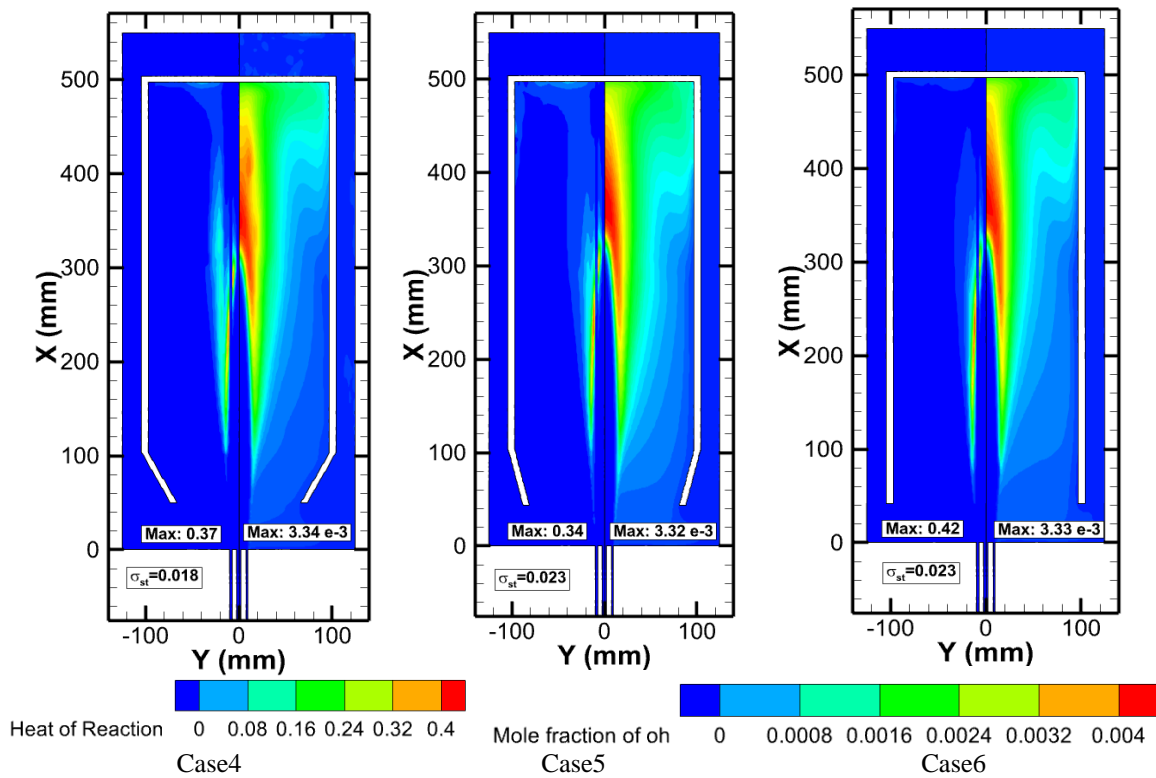


Figure 12- Distribution of released heat and mole fraction of OH* species

شکل ۱۲- سمت چپ توزیع حرارت آزاد شده و سمت راست کسر مولی گونه‌ی OH*

در رابطه با محل قرارگیری جسم مصرف کننده بهترین مکان، فاصله‌ی ۳۰۰ تا ۴۵۰ میلی‌متری از کف کوره است (در شکل ۱۳ مشخص شده است) که دارای توزیع دمایی یکنواخت‌تر و بیشترین توزیع حرارت آزاد شده را دارد.

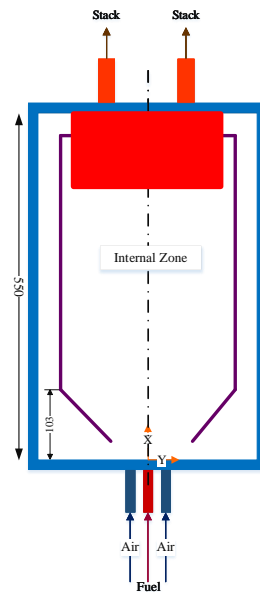


Figure 13- Suggested location for placing the heat consuming object

شکل ۱۳- محل پیشنهادی برای قرارگیری جسم مصرف کننده حرارت

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تأثیر زاویه بازوی سامانه بازچرخانی داخلی بر کیفیت احتراق بدون شعله در کوره‌های آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده به‌صورت زیر است:

- با افزودن سامانه بازچرخانی داخلی به هندسه، ناحیه‌ی بازچرخانی ۱۵۲/۷۱ درصد نسبت به کوره مرجع (با ضریب بازچرخانی ۲/۵۸) افزایش پیدا می‌کند. با تغییر زاویه بازو از ۹۰ درجه (بدون بازو) به ۷۵ درجه (بسته‌تر شدن هندسه)، مقدار ضریب بازچرخانی افزایش می‌یابد. این افزایش ضریب بازچرخانی تا زاویه‌ی ۶۰ درجه ادامه دارد و در این هندسه ۱۶۵/۵۰ درصد افزایش نسبت به حالت بدون سامانه داریم. با بسته‌تر شدن هندسه ضریب بازچرخانی نسبت به زاویه‌ی ۶۰ درجه کاهش می‌یابد.
- با مقایسه‌ی مقدار ضریب بازچرخانی در کل کوره مشاهده می‌شود که تغییر زاویه‌ی بازو در تغییرات مقدار این ضریب تأثیر قابل‌توجهی ندارد و تأثیر اصلی آن به روی طول ناحیه‌ی بازچرخانی است که منجر به تغییرات یکنواختی دما و حرارت آزاد شده می‌شود. در تمامی هندسه‌ها ناحیه‌ی بازچرخانی بیشتر از حالت بدون سامانه است.
- نتایج توزیع دما نشان می‌دهد، با کاهش زاویه بازو، دمای بیشینه نیز افزایش یافته است. تغییرات به‌گونه‌ای است که بیشینه‌ی دما در هندسه بدون بازو ۱۷۲۸ کلوین و در زاویه‌ی بازوی ۱۵ درجه نسبت به افق (هندسه‌ی بسته‌تر) ۱۷۳۸ است. هندسه با زاویه ۴۵ درجه بهترین طرح از لحاظ یکنواختی و مقدار دما است.
- مقدار حرارت آزاد شده در طرح هندسه ۶ که بدون بازو است دارای مقدار ۰/۸ وات است. با بسته شدن هندسه و در زاویه‌ی ۷۵ درجه کاهش ۲۰ درصدی این مقدار را شاهد هستیم. هندسه‌ی ۳۰ درجه با مقدار حرارت آزاد شده‌ی ۱/۲۳ وات و افزایش ۵۴ درصدی این پارامتر نسبت به طرح بدون بازو، بالاترین مقدار حرارت آزاد شده را دارد. بنابراین هندسه با زاویه‌ی بازوی ۳۰ درجه، بهترین هندسه از منظر پتانسیل انتقال حرارت است. هندسه‌ی ۱، ۲، ۵ و ۶ دارای انحراف از معیار یکسان با مقدار ۰/۰۲۳ هستند. هندسه‌ی ۴ با زاویه‌ی بازوی ۶۰ درجه نیز با انحراف از معیار ۰/۰۱۸ کمترین انحراف از معیار را دارد و می‌توان نتیجه گرفت که در هندسه‌ی ۴ با زاویه بازو ۶۰ درجه نسبت به سایر هندسه‌ها حرارت یکنواخت‌تر آزاد شده است.

در ادامه پژوهش حاضر می‌توان هندسه‌های مختلف سامانه بازچرخانی داخلی را مورد بررسی قرار داد و همچنین می‌توان توزیع دما، انتقال حرارت و بازده حرارتی را با قرار دادن جسم مصرف‌کننده درون کوره بررسی کرد.

منابع

- [1] Li, P. Mi, J. Dally, B. Wang, F. Wang, L. Liu, Z. Chen, S and Zheng, C, "Progress and recent trend in MILD combustion," Science China Technological Sciences, vol. 54, no. 2. Springer Science and Business Media LLC, pp. 255–269, Feb 2011.
- [2] A. A. A. Abuelnuor, M. A. Wahid, H. A. Mohammed, and A. Saat, "Flameless combustion role in the mitigation of NOX emission: a review," International Journal of Energy Research, vol. 38, no. 7. Hindawi Limited, pp. 827–846, Feb 2014.
- [3] S. Kumar, P. J. Paul, and H. S. Mukunda, "Studies on a new high-intensity low-emission burner," Proceedings of the Combustion Institute, vol. 29, no. 1. Elsevier BV, pp. 1131–1137, Jan 2002.
- [4] J. Wünnig, "Flameless oxidation to reduce thermal no-formation," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 23, no. 1. Elsevier BV, pp. 81–94, Feb 1997.
- [5] P. Gupta, R. S. Singh, A. Sachan, A. S. Vidyarthi, and A. Gupta, "Study on biogas production by anaerobic digestion of garden-waste," Fuel, vol. 95. Elsevier BV, pp. 495–498, May 2012.
- [6] B. A. FLECK, A. SOBIESIAK, and H. A. BECKER, "Experimental and Numerical Investigation of the Novel Low NO_xCGRI Burner," Combustion Science and Technology, vol. 161, no. 1. Informa UK Limited, pp. 89–112, Dec 2000.

- [7] A. Sobiesiak, S. Rahbar, and H. A. Becker, "Performance Characteristics of the Novel Low-NO_x CGRI Burner For Use with High Air Preheat," *Combustion and Flame*, vol. 115, no. 1–2. Elsevier BV, pp. 93–125, Oct 1998.
- [8] J. Mi, P. Li, B. B. Dally, and R. A. Craig, "Importance of Initial Momentum Rate and Air-Fuel Premixing on Moderate or Intense Low Oxygen Dilution (MILD) Combustion in a Recuperative Furnace," *Energy & Fuels*, vol. 23, no. 11. American Chemical Society (ACS), pp. 5349–5356, Nov 2009.
- [9] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, "Investigation of bluff-body micro-flameless combustion," *Energy Conversion and Management*, vol. 88. Elsevier BV, pp. 120–128, Dec 2014.
- [10] B. Liu, Y.-H. Wang, and H. Xu, "Mild combustion in forward flow furnace of refinery-off gas for low-emissions by deflector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 91. Elsevier BV, pp. 1048–1058, Dec. 2015.
- [11] F. Wang, P. Li, J. Mi, and Z. Shu, "A novel method to improve stability of MILD combustion in a highly heat-extracted furnace," *Fuel*, vol. 292. Elsevier BV, p. 120315, May 2021.
- [12] F. Mohammadzadeh Pormehr and M. Zabetian Targhi, "Deflector design to improve internal gas recirculation in a MILD combustion laboratory furnace," *Fuel*, vol. 360. Elsevier BV, p. 130542, Mar 2024.
- [13] G. SZEGO, B. DALLY, and G. NATHAN, "Scaling of NO_x emissions from a laboratory-scale mild combustion furnace," *Combustion and Flame*, vol. 154, no. 1–2. Elsevier BV, pp. 281–295, Jul 2008.
- [14] S. Cao, C. Zou, Q. Han, Y. Liu, D. Wu, and C. Zheng, "Numerical and Experimental Studies of NO Formation Mechanisms under Methane Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution (MILD) Combustion without Heated Air," *Energy & Fuels*, vol. 29, no. 3. American Chemical Society (ACS), pp. 1987–1996, Feb 2015.
- [15] S. Xu et al., "Effects of wall temperature on methane MILD combustion and heat transfer behaviors with non-preheated air," *Applied Thermal Engineering*, vol. 174. Elsevier BV, p. 115282, Jun 2020.
- [16] I. R. GRAN and B. F. MAGNUSSEN, "A Numerical Study of a Bluff-Body Stabilized Diffusion Flame. Part 2. Influence of Combustion Modeling And Finite-Rate Chemistry," *Combustion Science and Technology*, vol. 119, no. 1–6. Informa UK Limited, pp. 191–217, Oct 1996.
- [17] A. Mardani, "Optimization of the Eddy Dissipation Concept (EDC) model for turbulence-chemistry interactions under hot diluted combustion of CH₄/H₂," *Fuel*, vol. 191. Elsevier BV, pp. 114–129, Mar 2017.
- [18] D. He, Y. Yu, Y. Kuang, and C. Wang, "Analysis of EDC constants for predictions of methane MILD combustion," *Fuel*, vol. 324. Elsevier BV, p. 124542, Sep 2022.
- [19] C. Galletti, A. Parente, M. Derudi, R. Rota, and L. Tognotti, "Numerical and experimental analysis of NO emissions from a lab-scale burner fed with hydrogen-enriched fuels and operating in MILD combustion," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 19. Elsevier BV, pp. 8339–8351, Oct 2009.
- [20] M. De Joannon, A. Saponaro, and A. Cavaliere, "Zero-dimensional analysis of diluted oxidation of methane in rich conditions," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 2. Elsevier BV, pp. 1639–1646, Jan 2000.
- [21] W. P. Jones and R. P. Lindstedt, "Global reaction schemes for hydrocarbon combustion," *Combustion and Flame*, vol. 73, no. 3. Elsevier BV, pp. 233–249, Sep 1988.
- [22] G. D. Raithby and E. H. Chui, "A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures With Participating Media," *Journal of Heat Transfer*, vol. 112, no. 2. ASME International, pp. 415–423, May 1990.
- [23] J. R. Howell, M. P. Mengüç, K. Daun, and R. Siegel, *Thermal Radiation Heat Transfer*. CRC Press, 2020.
- [24] M. A. Rajhi, R. Ben-Mansour, M. A. Habib, M. A. Nemitallah, and K. Andersson, "Evaluation of gas radiation models in CFD modeling of oxy-combustion," *Energy Conversion and Management*, vol. 81. Elsevier BV, pp. 83–97, May 2014.
- [25] J. Wüning, "Flameless oxidation to reduce thermal no-formation," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 23, no. 1. Elsevier BV, pp. 81–94, Feb 1997.
- [26] P. Li, F. Wang, J. Mi, B. B. Dally, and Z. Mei, "MILD Combustion under Different Premixing Patterns and Characteristics of the Reaction Regime," *Energy & Fuels*, vol. 28, no. 3. American Chemical Society (ACS), pp. 2211–2226, Mar 2014.
- [27] Z. Zhao et al., "Effect of steam addition on turbulence-chemistry interaction behaviors of pulverized coal MILD-oxy combustion," *Fuel*, vol. 294. Elsevier BV, p. 120496, Jun 2021.
- [28] S. Jeon and Y. Kim, "Multi-environment Probability Density Function Modeling for Turbulent CH₄ Flames under Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution Combustion Conditions with Recirculated Flue Gases," *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 8. American Chemical Society (ACS), pp. 8685–8697, Jul 2017.

English Abstract

Effect of combustion products recycling system on temperature distribution and performance of flameless combustion furnace

Mehran KeramatiPour¹, Mohammad Zabetian Targhi^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, mehran_keramati@modares.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University, Tehran, Iran, zabetian@modares.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2024/03/10, Received in revised form: 2024/04/19, Accepted: 2024/04/24)

In this study, the conditions governing a flameless natural gas and air combustion furnace with an internal recirculation system equipped with an arm to increase the recirculation coefficient is numerically investigated on a laboratory scale. The effect of changing its angle on parameters of flameless combustion such as released heat, temperature distribution and internal recirculation coefficient was investigated. The simulation results show that by increasing the angle of the arm and opening the geometry up to 60 degrees, the flow is better directed into the furnace, and the volume of the recirculation area is the largest in the arrangement with an arm angle of 60 degrees. By comparing the value of the recirculation coefficient in the whole furnace, it is observed that its main effect is on the recirculation area, which leads to changes in the uniformity of temperature and released heat. By examining the maximum released heat, it can be concluded that the geometry design with an arm angle of 30 degrees is the best proposed geometry for heat treatment applications. By examining the temperature results, it was concluded that as the angle of the arm of the system is lower (the system becomes more closed) and the accumulation of the combustion flow inside it is greater, The temperature increases from 1727 K (for armless geometry) to 1738 K (for arm angle of 15 degrees).

Keywords: flameless combustion furnace, arm angle change, temperature distribution, internal recirculation system, internal recirculation coefficient