

بررسی تأثیر چینش‌های ورودی‌های هوا و سوخت بر عملکرد کوره احتراق بدون شعله

حامد جعفری^۱، محمد ضابطیان طرقي^۲*

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

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

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۱/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵)

چکیده: هدف از این مطالعه، بررسی شرایط حاکم بر یک کوره‌ی احتراق بدون شعله‌ی سوخت گاز طبیعی است. در این مقاله با تغییر چینش و فواصل چهار ورودی متقارن هوا از ورودی سوخت مرکزی، تغییرات ایجاد شده در پارامترهای مهم احتراق بدون شعله ایجاد شده در این رژیم احتراقی بررسی می‌شود. از مدل مفهوم اتلاف گردابه با تصحیح ضرایب، جهت مدل‌سازی احتراق با سینتیک شیمیایی کاهش یافته DRM22 استفاده شده است. دو آرایش متقارن با شکل‌های "ضربدر" و "بعلاوه" برای به حداقل رساندن فضای مرده در کوره برای ورودی‌های هوا تعیین شد. حد پایین فاصله‌ی ورودی هوا و سوخت با توجه به محدودیت ساخت ۱۲ میلی‌متر و حد بالای این فاصله در شبیه‌سازی، ۳۶ میلی‌متر فرض شد. در هندسه پیشنهادی در این مطالعه، ضریب بازچرخانی نسبت به کوره پایه ۲/۶ برابر شده است. همچنین دمای بیشینه ۵٪ و اختلاف دمای بیشینه و میانگین ۷۷ کلون نسبت به کوره پایه کاهش یافته است و این نشان‌دهنده یکنواختی دمای بهتر است. همچنین میزان بیشینه حرارت واکنش نقطه‌ای در کوره نسبت به کوره پایه ۶۳٪ رشد داشته و نشان‌دهنده پتانسیل بالاتر کوره در عملیات حرارتی است. امکان تعمیم نتایج این پژوهش به کوره‌های صنعتی گاز طبیعی وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: احتراق بدون شعله، چینش ورودی‌ها، توزیع دما، چینش بعلاوه و ضربدر

مقدمه

احتراق بدون شعله یک فناوری جدید است که اساس آن افزایش نرخ بازچرخشی (داخلی یا خارجی) گازهای داغ احتراقی با دمایی بالاتر دمای خود اشتعالی مخلوط سوخت است که موجب کاهش غلظت اکسیژن در ناحیه‌های واکنشی و انتشار شعله و نواحی واکنشی در فضای کوره می‌شود. در نتیجه احتراق بدون شعله باعث کاهش دمای بیشینه، افزایش دمای میانگین، کاهش اختلاف دمای بیشینه و کمینه در نواحی واکنشی، کاهش آلاینده‌های محیط‌زیستی مانند اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن، کاهش مصرف سوخت و افزایش بهره‌وری اقتصادی می‌شود. این فناوری به‌صورت کاربردی به‌خصوص در صنایع فولاد و متالورژی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج استفاده از احتراق بدون شعله با استفاده از پیش‌گرمایش به‌وسیله‌ی بازیاب حرارتی^۱ بیان کرده است که بازده تا بیش از ۳۰ درصد قابل افزایش بوده و به‌طور هم‌زمان آلایندگی اکسید نیتروژن تا ۷۰ درصد قابل کاهش است [۱]. فناوری بدون شعله دارای ویژگی‌های مهم دیگری نیز است که در اینجا به برخی از آن‌ها اشاره شده است. در این نوع احتراق فضایی را که سوخت در آن اکسید می‌شود، بیشتر توسط گازهای بی‌اثر اشغال شده و مقدار اکسیژن موجود در این فضا، حدود ۳ تا ۵ درصد است [۲]. دمای هوای ورودی تا بالاتر از ۹۰۰ کلون پیشگرم می‌شود و تا ۱۶۰۰ کلون هم گزارش شده است. توزیع دما در محفظه‌ی احتراق تقریباً همگن است، پس مقدار تنش حرارتی^۲ پایین است.

¹ Heat regenerator

² Thermal stress

در این فناوری، انتقال حرارت تشعشعی همگن است و انعطاف‌پذیری نسبت به سوخت مصرفی با توجه به عدم وجود شعله و به دنبال آن عدم مشکل پایداری شعله، از خصوصیات بسیار مهم این فناوری به حساب می‌آید [۳].

در ادامه به مطالعه پژوهش‌های پراهمیت در احتراق بدون شعله پرداخته می‌شود. کریشنامورتی و همکاران [۴]، بر روی کوره‌ای استوانه‌ای شکل با طول ۴/۵ متر و قطر ۱/۵ متر که با رژیم احتراقی سوخت-اکسیژن^۱ کار و توان ۲۶ کیلووات بر متر مکعب ایجاد می‌کند کار کردند. چند آرایش متفاوت برای ورودی نازل‌ها در نظر گرفته شد. در احتراق با رژیم شعله‌دار، در قسمت مرکز مشعل، درصد مولی گونه‌های کربن مونوکسید و هیدروژن بیشتر از حالت بدون شعله است و همچنین میزان گازهای سوخته نشده اتان و پروپان در دو حالت مساوی است. مصرف سوخت در حالت رژیم احتراق بدون شعله به آرامی انجام می‌شود و تا حدود شعاع ۰/۰۲ میلی‌متر حضور دارد، درحالی‌که در رژیم احتراق شعله‌دار، سوخت تا شعاع ۰/۰۱ میلی‌متر وجود دارد و این به یکنواخت‌تر شدن احتراق و شعله در حالت رژیم احتراق بدون شعله کمک می‌کند. همچنین حضور گونه دی‌اکسید کربن در قسمت مرکز مشعل که از محصولات احتراق است، نشان‌دهنده این است که در حالت بدون شعله بازچرخانی گاز سوخته به‌خوبی انجام می‌شود. لی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۷ به تحلیل عددی اثر چیدمان نازل و سرعت ورودی سوخت و هوا و نسبت سوخت به هوا (اکسنده) در ایجاد رژیم احتراق بدون شعله در یک مخزن اکسایش جزئی غیر کاتالیستی گاز متان پرداختند. پیکربندی برای دو حالت نفوذی معکوس^۲ و معمولی^۳ که در هر دو حالت، سوخت و اکسیژن به‌صورت پیش‌گرم نشده و در دما و فشار اتاق تزریق می‌شود. شعله در مدل چینش معمولی کاملاً مرئی و واضح است. این شعله قابل مشاهده به خاطر اکسیژن و گاز سوخته با دمای بالا به وجود می‌آید، اما هنگامی که آرایش از چینش معمولی به چینش معکوس تغییر می‌کند، شعله غیرقابل مشاهده می‌شود. توزیع یکنواخت دما در تمام نواحی محفظه احتراق در حالت چینش معکوس قابل مشاهده است، متان به‌ازای چینش معمولی، در قسمتی باریک از احتراق سریعاً مصرف می‌شود ولی به ازای چینش معکوس، متان در ناحیه بزرگ‌تری از محیط محفظه احتراق به مصرف می‌رسد و در نتیجه واکنش‌های احتراق در ناحیهی بزرگ‌تری اتفاق می‌افتد.

یکنواختی شعله و پارامترهای مهم احتراق در عملکرد کوره تأثیرگذار می‌باشند. ژو و همکارانش [۶] به تحلیل ورودی مشعل برای رسیدن به رژیم احتراق بدون شعله پرداختند. ساختار ورودی مشعل در حالت رژیم احتراق شعله‌دار، دارای یک جسم صلب بعد از ورودی سوخت و هوا است و باعث اختلاط دیرتر می‌شود ولی در حالت رژیم احتراق بدون شعله، اختلاط سریع‌تر انجام می‌شود. ساختار شعله پیش‌بینی‌شده در حالت با شعله، به لبه مشعل تو خالی متصل شده و با پیشرفت محدوده احتراق در پایین‌دست، پهنای شعاعی آن به محدوده وسیع‌تری را در بر می‌گیرد. اما در حالت احتراق بدون شعله، رادیکال OH در ناحیه وسیع‌تری پخش شده است و غلظت پایین‌تری از OH در مجاورت خروجی مشعل وجود دارد و این به معنی این است که شعله با یکنواختی بیشتری پخش می‌شود. خلیل و گوپتا [۷] به بررسی تأثیر پیکربندی‌های متفاوت جایگیری ورودی سوخت و خروجی محصولات احتراق در یک محفظه احتراق طراحی شده برای توربین گازی را بر کارکرد رژیم احتراق بدون شعله‌ای به وجود آمده آزمایشگاهی برای سوخت متان پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند در چینشی که اختلاط میان سوخت و محصولات احتراقی در آن افزایش یافته بود، شدت گونه رادیکالی هیدروکسیل افزایش می‌یابد و ناحیه توزیع آن وسیع‌تر می‌شود. بعلاوه کاهش نسبت هم‌ارزی موجب کم شدن شدت گونه رادیکالی می‌شود. در سال ۲۰۲۱ تو و همکاران [۸]، به روش‌های عددی و تجربی ویژگی‌های رژیم احتراق بدون شعله در سوخت‌های هیدروکربنی را بررسی کردند. به‌صورت ویژه، C_3H_8 به‌عنوان سوخت سنگین‌تر برای پژوهش انتخاب شد. مطالعه در یک کوره مقیاس آزمایشگاهی تحت دو حالت رژیم احتراق با شعله و بدون شعله، انجام شده است. دو مدل پیکربندی متفاوت برای ورودی سوخت و هوا منظور شده است. چینش اول،

¹ Oxy-feul

² Inverse diffusion configuration

³ Normal diffusion configuration

ورودی هوا قطر بزرگ‌تر و فاصله بیشتری از ورودی سوخت دارا است که با یک دیواره تا سر کوره از هم جدا می‌شوند. در مسیر ورود جریان هوا به کوره، مانعی وجود دارد. در چینش بعدی، ورودی هوا قطر و فاصله کمتری از ورودی سوخت دارد و سوخت و هوا در داخل خود مشعل با هم مخلوط شده و از مجرای وارد محفظه کوره می‌شوند. در احتراقی که ورودی سوخت و هوا نزدیک یکدیگر هستند، رژیم احتراق بدون شعله مشاهده می‌شود.

با توجه به مطالعات پیشین، با در نظر گرفتن اهمیت توزیع یکنواخت دما و در نتیجه افزایش بازدهی حرارتی در کوره عملیات حرارتی، در این پژوهش به بررسی رژیم احتراق بدون شعله با تغییر دادن آرایش ورودی‌های هوا پرداختیم. آرایش ورودی‌ها تأثیر زیادی روی رژیم احتراقی و پارامترهای پراهمیت در کوره‌های احتراق بدون شعله دارند. بررسی مطالعات نشان داد، خلأ تحقیقاتی در زمینه‌ی بررسی تأثیر فاصله ورودی هوا از سوخت روی احتراق بدون شعله با گاز متان و همچنین عدم بررسی تأثیر چینش ورودی‌ها روی پارامترهای احتراقی مهم شامل ضریب بازچرخانی، پراکندگی رادیکال OH و آلاینده‌ی مونوکسید نیتروژن وجود دارد و فقط یک پژوهش روی کوره‌ای غیر از کوره دالی و با سوخت پروپان به این موضوع پرداخته است. همچنین، هیچ‌گونه مطالعه‌ای در بررسی هندسه‌های سامانه کوره آزمایشگاهی احتراق بدون شعله با سوخت متان انجام نشده است؛ بنابراین، در پژوهش حاضر با بررسی تأثیر تغییر پیکربندی ورودی‌های هوا، خلأ تحقیقاتی در این زمینه برطرف خواهد شد.

معادلات حاکم، هندسه و روش حل عددی

برای پیش‌بینی احتراق بدون شعله در یک کوره آزمایشگاهی، نیاز به مدل‌سازی آشفته‌گی، احتراقی و انتقال حرارت تشعشی است. پیش‌بینی دقیق آشفته‌گی جریان در مدل‌سازی احتراق بسیار مهم است، زیرا بر میدان جریان و آشفته‌گی-شیمی جریان تأثیر زیادی دارد. برای محاسبه آشفته‌گی جریان از مدل‌های دو معادله‌ای مثل $k-\epsilon$ و $k-\omega$ می‌توان استفاده نمود. به دلیل این‌که مدل $k-\omega$ به حل مستقیم متغیرها در نزدیکی دیواره می‌پردازد، نیاز به شبکه ریزتر و سنگین‌تر در نزدیکی دیواره دارد [۹، ۱۰]. مدل $k-\epsilon$ ، تقریب نیمه تجربی مبتنی بر محاسبه‌ی رابطه‌ی انتقال انرژی جنبشی آشفته‌گی و نرخ اضمحلال آن است. طبق پژوهش کریستو و دالی [۱۱] مدل $k-\epsilon$ تحقق‌پذیر، ضعف‌های مدل $k-\epsilon$ استاندارد در شبیه‌سازی جریان‌های دارای ناحیه‌ی بازچرخانی را حل می‌کند. همچنین آن‌ها نشان دادند مدل $k-\epsilon$ استاندارد با اصلاح ضریب $C_{\epsilon 1}$ از $1/44$ به $1/6$ نسبت به مدل $k-\epsilon$ تحقق‌پذیر انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایش تجربی دارد و همچنین نسبت به $k-\omega$ هزینه محاسباتی بسیار کمتری دارد؛ در نتیجه برای مدل‌سازی آشفته‌گی جریان، مدل $k-\epsilon$ استاندارد اصلاح شده برگزیده شد.

به‌منظور مدل‌سازی نرخ اعمال واکنش و انتقال گونه‌ها، مدل‌های گوناگونی بیان شده است. پژوهش‌های عددی روی کوره‌های احتراق بدون شعله بیان کرده‌اند که مدل احتراقی مفهوم اتلاف گردابه^۱ توزیع دما و گونه‌ها را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند [۱۲، ۱۳]؛ چون می‌تواند برهمکنش اغتشاشی و واکنشی را برای سینتیک شیمیایی به کمک واکنش‌های جزئی مفصل منظور کند و سبب انطباق خوب نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج تجربی شود. در این مدل مفروض است که واکنش‌ها در نواحی اضمحلال انرژی آشفته‌گی اتفاق می‌افتند [۱۴]. پژوهش عددی مردانی [۱۵] روی مشعل JHC^2 نیز مشخص کرد که با ثابت کردن ضریب C_{D1} و کم کردن ضریب C_{D2} باعث کاهش ثابت ضریب مقیاس زمانی واکنش (C_T) به 0.0893 و مقیاس کسر حجمی به عدد ۱ شده که باعث بهبود نتایج شبیه‌سازی احتراقی از روش مدل مفهوم اتلاف گردابه در تعیین ارتفاع شعله، مقدار بیشینه‌ی دما و گونه‌ها می‌شود. C_T میزان کسر حجمی سلول محاسباتی است که داخل آن واکنش شیمیایی رخ می‌دهد و C_T مقیاس زمانی است که واکنش شیمیایی در آن انجام می‌شود. با کم شدن ضرایب، نرخ انجام واکنش‌ها کم می‌شود و در ناحیه‌ی وسیع‌تری صورت می‌گیرد؛ در نتیجه، به احتراق بدون شعله نزدیک می‌شود. همان‌طور که

¹ EDC

² Jet in hot Co-flow

در جدول ۱ مشاهده می‌شود، دیه‌ی و همکاران [۱۶]، بر روی کوره اعتبارسنجی شده، مقدارهای متفاوتی برای ضرایب C_{D1} و C_{D2} مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها بیان کردند، مقدار $C_{D1} = 0.1357$ و $C_{D2} = 0.0737$ باعث افت مقدار ثابت مقیاس زمانی واکنش به 0.1567 و مقیاس کسر حجمی به $1/3161$ شده تا برای این کوره با وسیع‌تر شدن ناحیه‌ی انجام واکنش و کاهش حرارت آزاد شده، نتایج پیش‌بینی بهبود یابد.

جدول ۱- ضرایب مدل احتراقی EDC استفاده در پژوهش مطابق مطالعه دی‌هی و همکاران [۱۶]

Table 1- The coefficients of the EDC combustion model in the study as study of D.He i et al[16].		
Coefficient	residence time scale	mass fraction constant
Variable	C_r	C_y
Default Value	0.4083	2.1377
Modified Value	0.1567	1.3161

سینتیک شیمیایی نقش پراهمیتی در حصول دما و گونه‌های شیمیایی در احتراق ایفا می‌کند. سینتیک شیمیایی کاهش‌یافته‌ی DRM19 با ۱۹ گونه و ۸۴ واکنش، DRM22 با ۲۲ گونه و ۱۰۴ واکنش و سینتیک شیمیایی GRI3.0 با ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش از سینتیک شیمیایی‌های معروف مورد استفاده در مدل‌سازی احتراق بدون شعله می‌باشند. گلتی و همکاران [۹] بیان کردند که میانگین خطای نسبی در پیش‌بینی دمای متوسط با استفاده از سینتیک شیمیایی DRM19 و GRI3.0 برابر بوده و کمتر از ۵٪ در مقایسه با داده‌های تجربی است. سینتیک شیمیایی DRM22 با تقریب خوبی همه‌ی واکنش‌های مربوط به اکسیداسیون گاز متان را در بر می‌گیرد. خصوصاً واکنش‌های مربوط به C_2 که برای اکسیداسیون متان پراهمیت است [۱۰]. در این پژوهش، در آغاز، با استفاده از سینتیک شیمیایی چهار مرحله‌ای جانز و لینستد^۱ [۱۷] احتراق مدل‌سازی شد. این سینتیک شیمیایی دارای ۶ گونه‌ی H_2O ، O_2 ، CO ، CO_2 ، CH_4 و H_2 (بعلاوه N_2 به‌عنوان گاز بی‌اثر) و ۴ واکنش است. گونه‌های میانی پراهمیت شامل رادیکال OH^* و مسیرهای اکسیداسیون متان را منظور نمی‌کند. با دانش به هزینه‌های محاسباتی زیاد از حل با GRI3.0، پس از همگرایی حل سینتیک شیمیایی چهار مرحله‌ای، سینتیک شیمیایی کاهش‌یافته‌ی DRM22 جایگزین شد. این سینتیک شیمیایی نیز مسیرهای مربوط به تشکیل NO_x را منظور نمی‌کند که با درصدی خطا می‌توان از طریق پس پردازش مقدار NO_x را پیش‌بینی کرد.

با توجه به دمای بالای کوره‌ی احتراق بدون شعله و حضور محصولات احتراقی با ضریب جذب و نشر بالا مانند کربن دی‌اکسید و بخار آب، احتیاج به مدل‌سازی انتقال حرارت تشعشعی نیز است. مدل‌های عددی متفاوتی برای این هدف وجود دارد. مدل P1 و مدل جهات گسسته پرکاربردترین مدل‌های تشعشعی هستند [۱۸، ۱۹]. در مدل P1 معادله‌ی انتقال تشعشع به‌صورت یک رابطه‌ی دیفیوژن است. چون فقط شامل حل یک معادله‌ی نفوذ است، مدل ساده و کم هزینه‌ای است. این مدل در محیط‌هایی با ضخامت نوری بالای ۱ قابل استفاده است؛ در نتیجه، برای احتراقی که دارای ضخامت نوری کمتر از ۱ است، دقت قابل قبولی ندارد. اما مدل DO در همه‌ی محدوده‌های نوری قابل استفاده است. این مدل، معادله‌ی انتقال تشعشع را به مختصات کروی انتقال داده و محاسبه می‌کند [۲۰]؛ در نتیجه به‌عنوان مدل‌سازی انتقال حرارت تشعشعی، مدل DO مورد استفاده قرار گرفت. میزان پرتو تشعشعی در مدل DO در مدل‌سازی سه‌بعدی از رابطه‌ی (۱) به‌دست‌آمده که برای هر پرتو تشعشعی یک رابطه‌ی انتقال حل می‌شود. N_θ و N_ϕ و N تعداد تقسیم‌ها در جهات θ و ϕ و تعداد کل جهات در مختصات کروی می‌باشند. در این پژوهش، مدل تشعشعی DO با چینش $3 \times 3 \times 8$ انتخاب شد. این مقدار ابتدا $2 \times 2 \times 8$ و $3 \times 3 \times 3$ و در آخر $4 \times 4 \times 8$ در نظر گرفته شد. چینش اول با دوم حدود ۴۰ درجه اختلاف دما داشت، اما چینش تشعشعی دوم و سوم اختلاف ۱۱ درجه‌ای داشتند که مقدار قابل قبولی است. مقدار ضریب جذب ثابت در نظر گرفته نشد و از راه مجموع وزنی گازهای خاکستری به دست آورده شد [۲۱].

¹ Jones and Lindstedt

$$N = 8 \times N_{\theta} \times N_{\theta} \quad (1)$$

جریان داخل کوره، جریان تراکم‌ناپذیر و پایا در نظر شده است. در نتیجه حلگر پایه‌ی فشار برای این مسئله تعیین شد. برای حل معادلات حاکم قابلیت استفاده از الگوریتم‌های پیوسته^۱ یا مجزا^۲ وجود دارد. در الگوریتم مجزا، معادلات حاکم به صورت پشت سر هم و مجزا حل می‌شود، اما در الگوریتم پیوسته معادلات تکانه و پیوستگی با هم و در یک زمان حل شده و دارای سرعت همگرایی بیشتری نسبت به الگوریتم مجزا است. با توجه به حل پایا جریان احتراقی داخل کوره، الگوریتم SIMPLE برای جفت سرعت-فشار تعیین شد. در پژوهش حاضر، باقی‌مانده 10^{-6} برای همگرایی معادلات معین شده است. معیار همگرایی در این پژوهش دمای بیشینه و دمای میانگین بود. اختلاف این پارامترها در تکرارها در نتایج همگرا شده، به کمتر از ۱ کلوین می‌رسید و معیار دیگر میزان اکسیژن میانگین بود که اختلاف آن در تکرارها، به کمتر از ۱٪ می‌رسید.

مشخصات ورودی سوخت و هوا در جدول ۲، قابل مشاهده است. کوره پایه، کوره‌ی ساخته شده توسط دالی و همکاران است [۱۱]. همان طور که در شکل ۱ قابل مشاهده است، تغییرات اعمال شده شامل استفاده از سامانه‌ی بازچرخانی داخلی جهت افزایش نرخ بازچرخشی گازهای احتراق داخلی توسط محمدزاده و همکاران [۲۲] است که موجب افزایش کیفیت احتراق بدون شعله استفاده می‌شود. علت این کار افزایش زمان ماند محصولات احتراقی و رقیق‌سازی بهتر اکسیژن است. سامانه بازچرخانی و انتقال دودکش باعث شده نرخ بازچرخانی نسبت به کوره اصلی را $16/28$ درصد افزایش پیدا کند و بیشینه حرارت آزاد شده درون کوره تا $3/5$ درصد کاهش می‌یابد [۲۲]. دیگر تغییر ایجاد شده، تغییر قطر ورودی هوا برای رسیدن به تکانه بهینه در کوره است. این تغییر موجب افزایش شدت بازچرخش داخلی بیشتر می‌شود. با توجه به حلگر پایه فشار^۳ محدودیت‌هایی در تکانه ورودی وجود دارد. افزایش تکانه جریان ورودی طوری که وارد محدوده تراکم‌پذیری شود، موجب ایجاد خطا در شبیه‌سازی می‌شود. در پژوهش دیگری نیز مقدار تکانه بحرانی برای کوره دالی و همکاران برای حالت غیرپیش مخلوط به ترتیب برابر $0/097 \text{ (kg } \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$ محاسبه شده است [۲۳]. همچنین به منظور کاهش هزینه محاسباتی و مقایسه، توان مطابق با مسئله بررسی شده در قسمت اعتبارسنجی برابر با ۱۰ کیلووات در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر جسم ضخیم موجود در کوره پایه حذف و از لوله‌هایی با قطر کم برای ورود واکنش‌دهنده‌ها با سرعت بالا استفاده شده است و برای پیش‌گرمایش کوره، از مشعل با توان ۱۵ کیلووات استفاده شده است. در حالت غیر پیش مخلوط هرچه تعداد ورودی‌های هوا کمتر باشد، سطح مقطع ورودی کمتر شده و میزان سرعت و تکانه جریان ورودی بیشتر می‌شود. اما باید توجه داشت که اگر یک یا دو ورودی برای هوا در نظر گرفته شود، جریان هوا به طور متقارن بخش نشده و هوا به قسمت‌هایی از کوره نرسیده و موجب افزایش زمان ماند محصولات احتراق و کاهش وسعت ناحیه واکنش می‌شود. در این قسمت محدودیت‌های فواصل بین ورودی‌های سوخت و هوا بیان می‌شود. در کمترین فاصله، یعنی ۱۲ میلی‌متر، فاصله‌ی بین دیواره‌های نازل ورودی سوخت و هوا ۳ میلی‌متر می‌شود که حالتی بحرانی برای ساخت است. همچنین با بالا بردن فاصله‌ی بین ورودی سوخت و هوا در شبیه‌سازی تا ۳۶ میلی‌متر، دمای بیشینه احتراق به نزدیک ۲۰۱۰ کلوین می‌رسد و نقاطی داغ درون کوره ایجاد می‌شود که مخالف یکنواختی در احتراق بدون شعله است و مناسب کاربری صنعتی و عملیات حرارتی نمی‌باشد. همچنین اختلاف دمای بیشینه و میانگین در این هندسه ۳۹۳ کلوین است، که بسیار بیشتر از ۶ هندسه دیگر است که در ادامه بررسی می‌شوند. در پژوهش حاضر، در محدوده فواصل به دست آمده، تعداد سه چینش در حالت کلی بعلاوه و سه چینش در حالت کلی ضربدری با جزئیات هندسی ذکر شده در جدول ۳، مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

¹ Couple Algorithm

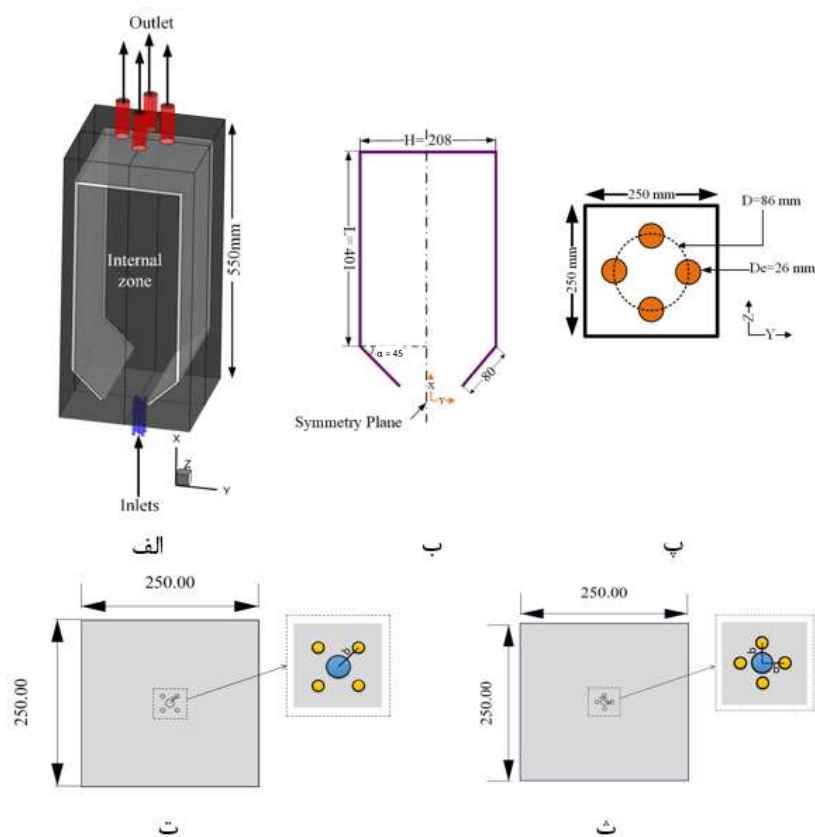
² Segregated Algorithm

³ Pressure base

جدول ۲- مشخصات کوره، اکسنده و اکسایش گر

Table 2-Furnace, oxidizer and oxidizer characteristics

Variable	Unit	fuel	air
Combinations	Vol%	$CH_4 = 100$	$O_2 = 21$ & $N_2 = 79$
Temperature	K	306	306
Discharge	kg/s	0.000189	0.00378
Extended air	(%)	—	25
Power	kW	10	
Walls Temperature		1520K	



شکل ۱- الف) طرحواره کوره ب) سامانه بازچرخانی داخلی پ) جایگیری دودکش‌ها ت) چینش حال ضربدر ث) چینش حالت بعلاوه
Figure 1- A) Furnace schematic B) Internal recirculation system C) Placement of chimneys T) Cross arrangement C) Plus arrangement

جدول ۳- مشخصات هندسه‌های بررسی شده در پژوهش حاضر

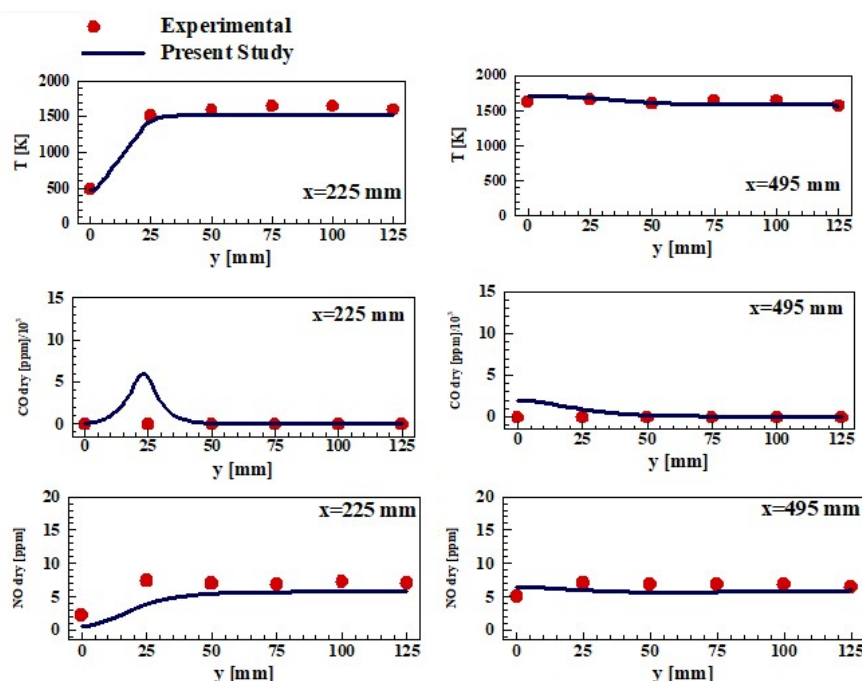
Table 3-Specifications of the investigated geometries in the current research

	X configuration			+ configuration		
Case Number	1	2	3	4	5	6
b (mm)	12	20	28	12	20	28

اعتبارسنجی

برای صحت‌سنجی و شبیه‌سازی احتراق بدون شعله از کوره‌ی کائو و همکاران [۲۴] استفاده شد. کوره‌ی احتراق بدون شعله، مشابه کوره‌ی دانشگاه آدلاید [۱۱] است. کوره‌ی مکعبی با مقادیر طول و مقطع به ترتیب ۵۵۰ و ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر است. در پژوهش کائو و همکاران [۲۴] درگاه‌های اندازه‌گیری هر ۲۵ میلی‌متر از دیواره‌ی جانبی کوره تا خط مرکزی، در مقاطع پنج‌گانه $x=135\text{mm}$, $x=225\text{mm}$, $x=315\text{mm}$, $x=405\text{mm}$ و $x=495\text{mm}$ جهت اندازه‌گیری دما و گونه‌ها (CO , O_2 و NO) تعبیه شده است. چهار لوله‌ی خروجی گازهای محصول احتراق با مشعل در یک صفحه قرار دارند. مشعل شامل یک نازل سوخت مرکزی، یک لوله‌ی هوای حلقوی و جسم ضخیم بین لوله‌ی سوخت و هوا است.

با توجه به تقارن فیزیکی و هندسی مسئله، شرط مرزی تقارن انتخاب شده و فقط یک چهارم کل کوره شبیه‌سازی شد. در دیواره‌ها، شرط مرزی دیوار با دمای ثابت ۱۵۲۰ کلوین در تعیین شده است. ظرفیت حرارتی کوره ۹/۵ کیلووات و نسبت هم‌ارزی آن ۰/۷ است. هوا و سوخت در دمای ۳۰۶ کلوین با ۲۵ درصد هوای اضافی از طریق نازل وارد کوره می‌شود. سرعت هوا و سوخت در خروجی مشعل ۲۲/۳۸ و ۹/۳۲ متر بر ثانیه است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی دمای کوره تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. همچنین عدم نقطه‌ی بیشینه گونه CO در شبیه‌سازی و نتایج تجربی، می‌تواند به علت خطای اندازه‌گیری (جایگیری غلط حسگر) باشد. خطای نسبی در پیش‌بینی دما ۴/۷۷٪ است.



شکل ۲- مقایسه‌ی دما و گونه‌ها (CO , O_2 و NO) با داده‌های (●) تجربی کائو و همکاران [۲۴] با نتایج پیش‌بینی (—)

Figure 2-Comparing the the experimental data of Cao et al[24] with prediction results of temperature and species (O_2 , CO and NO)

مطالعه‌ی پارامترهای احتراق بدون شعله

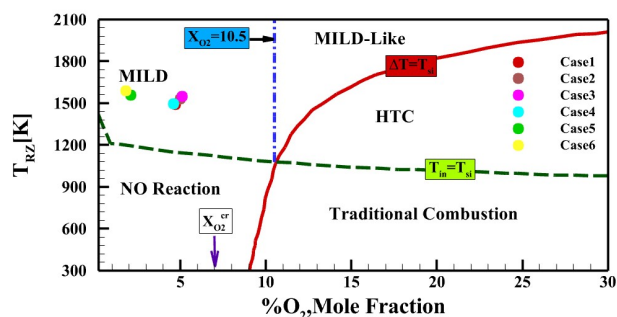
در این قسمت ابتدا به بررسی معیارهای احتراق بدون شعله در هندسه‌های پیشنهادی پرداخته می‌شود. سپس تأثیر چینش‌های ورودی‌های سوخت و هوا روی میدان جریان، سرعت و ضریب بازچرخش داخلی، توزیع دما و پراکندگی گونه OH در احتراق بدون شعله بررسی می‌شود.

بررسی ایجاد احتراق بدون شعله

در این پژوهش برای بررسی نوع رژیم احتراقی، سه معیار مورد مطالعه قرار گرفت. اولین معیار، توسط وونگ و همکاران [۲۵] است که پایه آن بر اساس اختلاف دمای بیشینه ورودی و کسر مولی اکسیژن در مخلوط ورودی است. با توجه به این که در این پژوهش ما اختلاط غیر پیش آمیخته داریم، ناحیه ورودی در معیار وونگ همان مقطعی است که واکنش‌های زنجیره‌ای در آن آغاز می‌شود. ناحیه‌ی بالا رفتن میزان آزاد شدن گرما، همان لبه‌ی واکنشی در نظر گرفته می‌شود و میزان دمای ورودی و کسر مولی ازین ناحیه به دست می‌آید [۲۶]. دمای مخلوط ورودی در ناحیه واکنشی در تمام هندسه‌ها بیشتر از دمای خوداشتعالی سوخت متان بوده و اختلاف دمای ورودی و بیشینه نیز بالاتر از دمای خوداشتعالی است، پس همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در هر شش هندسه، رژیم احتراقی حاصله، احتراق بدون شعله است.

معیار بعدی که بررسی می‌شود، معیار کوالیر و ژواننون [۳] است. در این معیار اگر دمای خود اشتعالی سوخت کمتر از دمای ناحیه واکنشی و بیشتر از اختلاف دمای ناحیه واکنشی و دمای بیشینه باشد، رژیم احتراقی بدون شعله است. برای شش هندسه پیشنهادی مقادیر دمای ناحیه واکنشی، دمای بیشینه و اختلاف آن‌ها در جدول ۴ مشاهده می‌شود. مطابق آنچه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، رژیم احتراقی در تمامی شش هندسه، در حالت احتراق بدون شعله قرار می‌گیرد.

در معیارهای گفته‌شده، در تشخیص و تعیین ناحیه واکنشی ضعف وجود دارد. برای اطمینان بیشتر از قرارگیری هندسه‌ها در رژیم احتراقی بدون شعله، معیار وونینگ [۲۷] نیز مورد تحلیل قرار گرفته است. این معیار بر اساس میزان ضریب بازچرخانی محصولات احتراقی و دمای میانگین کوره برای اکسیداسیون متان با هوا بنا شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شش هندسه پیشنهادی در رژیم احتراقی بدون شعله قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگر میزان بازچرخانی کمتر باشد، رژیم احتراقی در ناحیه بدون شعله قرار می‌گیرد. این معیار در حالت غیرپیش آمیخته کاربرد بیشتر و دقیق‌تری دارد.



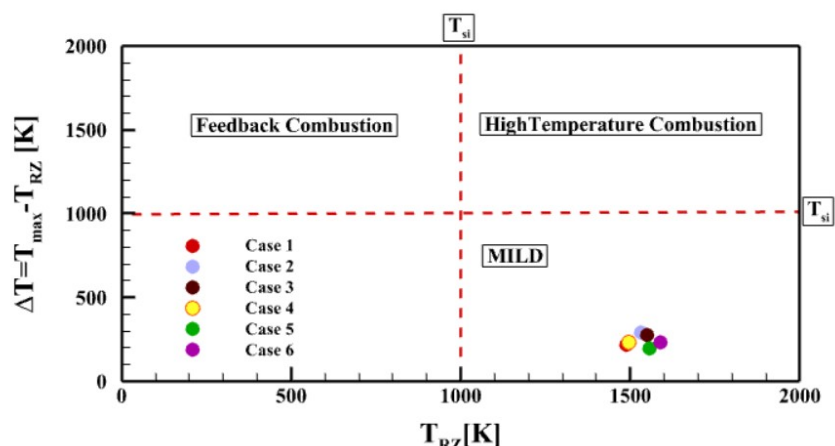
شکل ۳- بررسی معیار وونگ [۲۵] برای مشخص کردن رژیم احتراقی در شش طرح پیشنهادی

Figure 3- Investigating Wang's criteria[25] to determine the combustion regime in six proposed designs

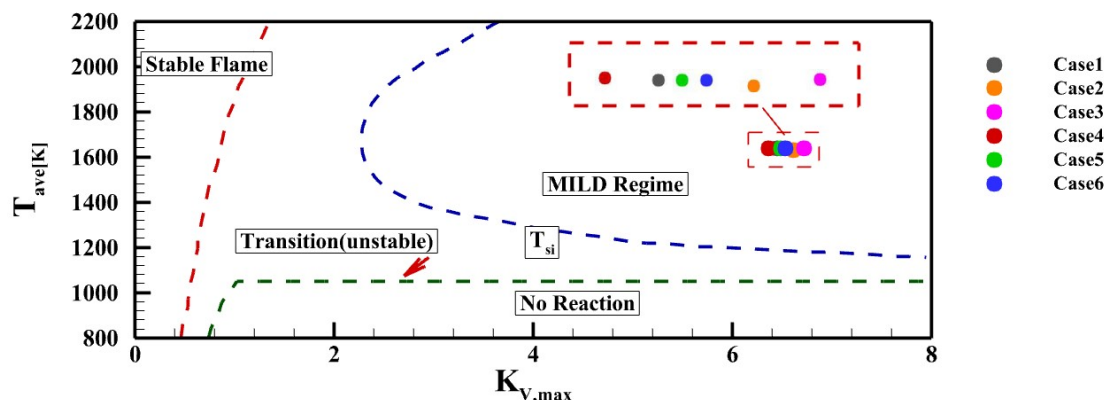
جدول ۴- دمای ناحیه‌ی واکنشی، دمای بیشینه و اختلاف آن‌ها برای شش آرایش پیشنهادی

Table 4- Reaction zone temperature, maximum temperature and their difference for six proposed arrangements

Case Number	Temperature of the reaction zone [K]	Maximum temperature [K]	Difference of maximum temperature and reaction zone [K]
1	1490	1707	217
2	1530	1822	292
3	1550	1827	277
4	1495	1726	231
5	1556	1755	199
6	1590	1821	231



شکل ۴- معیار کاوالیر و ژوانون[۳] برای تحلیل رژیم احتراقی در شش هندسه پیشنهادی
Figure 4- Cavalier and joauanon criterion[3] for the analysis of the combustion regime in six proposed designs



شکل ۵- معیار وونینگ [۲۷] برای تحلیل رژیم احتراقی در شش طرح پیشنهادی
Figure 5- Wunning's criterion [27] for the analysis of the combustion regime in six proposed designs

تأثیر چینش ورودی‌های سوخت و هوا روی میدان جریان، سرعت و ضریب بازچرخش داخلی

میدان جریان یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر عملکرد احتراق بدون شعله است. میزان رقیق‌سازی سوخت و توسط هوای ورودی و محصولات احتراقی و میزان گرادیان دمایی درون کوره وابسته به توزیع جریان درون کوره است [۲۸]. شکل ۵ در دو بخش نشان‌دهنده توزیع سرعت و خطوط جریان در سمت چپ و فشار در سمت راست در صفحه‌ی قطری کوره در شش طرح است. برای مقایسه میزان شدت گردابه‌های تشکیل شده در هر هندسه با حالت پایه، مقدار ضریب بازچرخانی داخلی در مقطع ۴۰۰ میلی‌متری به‌دست‌آمده است. ضریب بازچرخانی داخلی (K_v) جهت بیان کمی نرخ بازچرخشی درون کوره، از معادلات (۲) و (۳) که توسط وونینگ [۲۷] به‌دست‌آمده، محاسبه می‌شود.

$$K_v = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_{in}} = \frac{\dot{m}_{up} - (\dot{m}_a + \dot{m}_f)}{\dot{m}_a + \dot{m}_f} \quad (2)$$

$\dot{m}_{up}$ دبی جرمی جریانی است که در راستای جهت جریان درون کوره شارش دارد:

$$\dot{m}_{up} = \iint \rho \times V_x \times dA \quad , \quad V_x > 0 \quad (3)$$

شکل ۶، نمودار ضریب بازچرخشی داخلی در صفحات عمود بر جریان در راستای X را نشان می‌دهد. در هر هندسه، ضریب بازچرخشی در جهت جریان زیاد می‌شود و سپس با نزدیک شدن به انتهای سامانه به‌طور ناگهانی افت می‌کند. در هندسه‌های شماره ۱ و ۴، مقدار بیشینه ضریب بازچرخشی در انتهای کوره و در هندسه‌های شماره ۳ و ۶ این مقدار بیشینه در نیمه ابتدایی کوره قرار دارد. بلندتر شدن طول گردابه پایینی دفلکتور به میزان ۸٪ در هندسه‌های شماره ۳ و ۶، باعث ایجاد بازچرخش بیشینه در نیمه ابتدایی کوره است. اما در دو هندسه ۱ و ۴، به علت بلندتر بودن طول گردابه انتهایی دفلکتور و نرخ اختلاط بالاتر در این ناحیه و عمق نفوذ بیشتر، میزان بیشینه ضریب بازچرخش داخلی در نیمه دوم کوره و نواحی انتهایی کوره اتفاق می‌افتد. این نمودار همچنین نشان می‌دهد که با کاهش فاصله‌ی بین ورودی سوخت و هوا، میزان بیشینه ضریب بازچرخش داخلی به قسمت‌های انتهایی تر کوره می‌رسد (بین ۴۰۰ و ۴۹۰) اما مقدار بیشینه ضریب بازچرخشی داخلی در هندسه‌های سه و شش، جایی در میانه کوره (بین ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر) است. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج گذشته [۲۲]، می‌توان افزایش ضریب بازچرخشی را مربوط به افزایش تکانه ورودی‌ها و کاهش فضای مرده در کوره در نظر گرفت. میزان ضریب بازچرخشی نسبت به کوره محمدزاده و همکاران رشد ۲/۲ برابری داشته است. همچنین میزان بیشینه ضریب بازچرخشی در هندسه شماره ۳ نسبت به پژوهش التجایی و همکاران، ۹٪ رشد داشته است [۲۳].

در پژوهش لی و همکاران [۲۵] و محمدزاده و همکاران [۲۲] برای کوره‌ی دالی [۱۱]، ضریب بازچرخشی در کیس پیشنهادی در مقطع $x = 400 \text{ mm}$ ، به ترتیب مقادیر ۲/۵۸ محاسبه شده است. برای مقایسه تأثیر تغییر آرایش ورودی‌ها و افزودن سامانه بازچرخانی، نسبت کاهش یا افزایش ضریب بازچرخشی داخلی در هندسه‌های پیشنهادی نسبت به مطالعه‌ی لی و محمدزاده از معادله‌ی (۴) محاسبه شده و در جدول ۵ آورده شده است [۱۱].

$$K_V(\text{ratio}) = \left(\frac{K_{V,C}}{K_{V\text{Base}1,2}} \right) \quad (4)$$

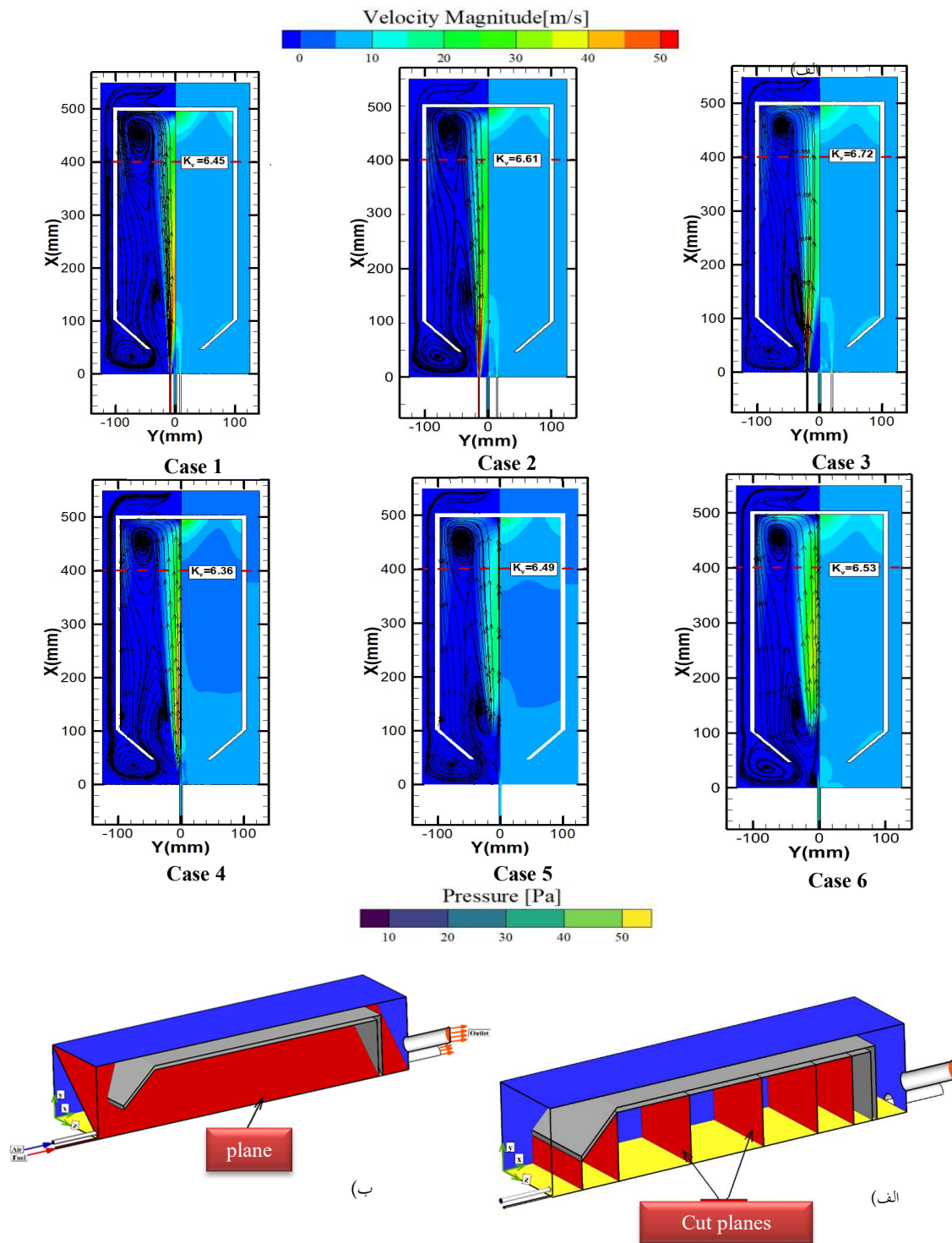
در معادله بالا C نشان دهنده شماره هندسه و $K_{V\text{Base}1}$ مربوط به ضریب بازچرخشی کوره لی و $K_{V\text{Base}2}$ مربوط به ضریب بازچرخشی مطالعه محمدزاده است. مشاهده شده است که در تمامی طرح‌های پیشنهادی، ضریب بازچرخشی افزایش چشمگیری داشته است و تا دو و نیم برابر شاهد رشد ضریب بازچرخشی هستیم.

جدول ۵- درصد افزایش یا کاهش ضریب بازچرخشی در شش طرح پیشنهادی نسبت به مطالعه‌ی لی و همکاران [۲۵] و محمدزاده و

همکاران [۲۲]

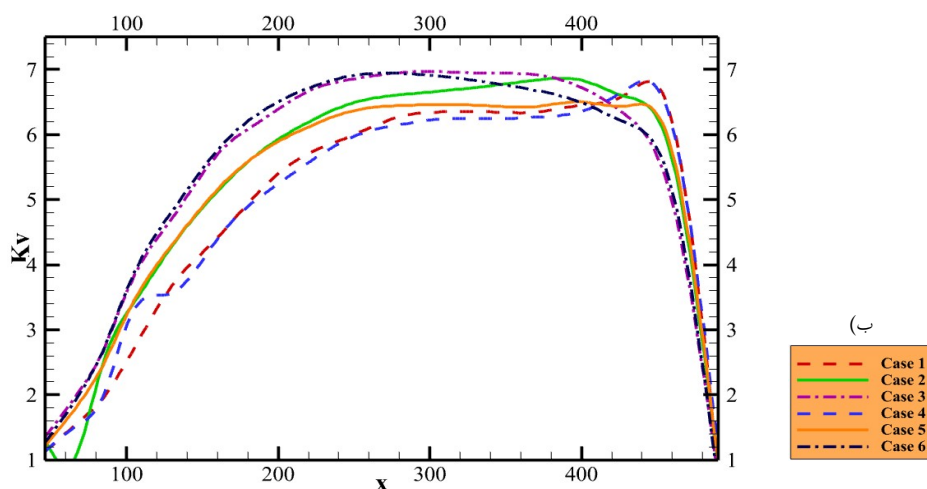
Table 5-The percentage of increase or decrease of recycling coefficient in six proposed designs compared to the study of Lee et al [25] and mohammadzadeh et al[22]

Case Number	$K_{V1}(\text{ratio})$	$K_{V2}(\text{ratio})$
1	2.50	2.13
2	2.56	2.19
3	2.60	2.22
4	2.47	2.10
5	2.51	2.15
6	2.53	2.16



شکل ۶- الف) توزیع سرعت در سمت چپ و فشار در سمت راست در صفحه قطری کوره برای شش طرح و ب) صفحه مورد نظر برای بررسی پارامترهای احتراقی

Figure 6- a) Velocity distribution on the left side and pressure on the right side in the diagonal plane of the furnace for six designs and b) the desired plane to check the combustion parameters.



شکل ۷- الف) صفحات مورد بررسی در باز چرخش داخلی ب) نمودار توزیع ضریب باز چرخشی داخلی (K_v) نسبت به مقطع کوره به ازای شش طرح پیشنهادی سامانه‌ی باز چرخانی داخلی

Figure 7- a) The investigated pages in internal recycling b) Distribution diagram of internal recycling coefficient (K_v) relative to the cross section of the furnace for six proposed designs of internal recycling system

تأثیر چینش‌ها ورودی‌های سوخت و هوا روی توزیع دما و پراکندگی گونه OH

پایین بودن میزان گرادیان دمای درون کوره و افزایش یکنواختی دمای کوره از ویژگی‌های مهم احتراق بدون شعله است. افزایش یکنواختی دما در کوره‌های بدون شعله صنعتی مثل کوره‌های عملیات حرارتی باعث می‌شود تنش حرارتی روی محصول کاهش یابد و باعث بالا رفتن کیفیت محصول عملیات حرارتی شده می‌شود. گونه OH نشان‌دهنده ناحیه واکنشی بوده و هرچه این گونه در ناحیه بزرگ‌تری وجود داشته باشد به منزله وقوع احتراق در فضای بزرگ‌تری است، بنابراین در مطالعه حاضر، شش هندسه پیشنهاد شده از جهت یکنواختی و توزیع دما مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مقدار بیشینه، میانگین و اختلاف بین بیشینه و میانگین دما در کوره برای شش طرح پیشنهادی در جدول ۶ مشاهده می‌شود. میزان بیشینه دما با افزایش فاصله‌ی بین ورودی سوخت و هوا افزایش یافته است. همچنین در هندسه‌های ۴ و ۵ و ۶، بیشینه‌ی دمای بیشتری نسبت به حالت بعلاوه مشاهده می‌شود، اما میانگین دما در حالت بعلاوه، کمی بیشتر است. هندسه ۴ و ۵ و ۶ دارای بیشترین میانگین دمایی می‌باشند. این هندسه‌ها مناسب برای کاربرد عملیات حرارتی با دمای بالا می‌باشند. اختلاف بین میانگین و بیشینه هوا، یکی از پارامترهای پراهمیت در نشان دادن یکنواختی دمای درون کوره است. هرچه این میزان کمتر باشد، به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر است. میزان این پارامتر در هندسه ۱ و ۴ عدد ۷۳ و ۸۷ است که نسبت به کوره پایه ۷۷ و ۶۳ کلوین کاهش یافته است.

جدول ۶- مقدار بیشینه، میانگین و اختلاف بین بیشینه و میانگین دما

Table 6-Maximum value, average and difference between maximum and average temperature

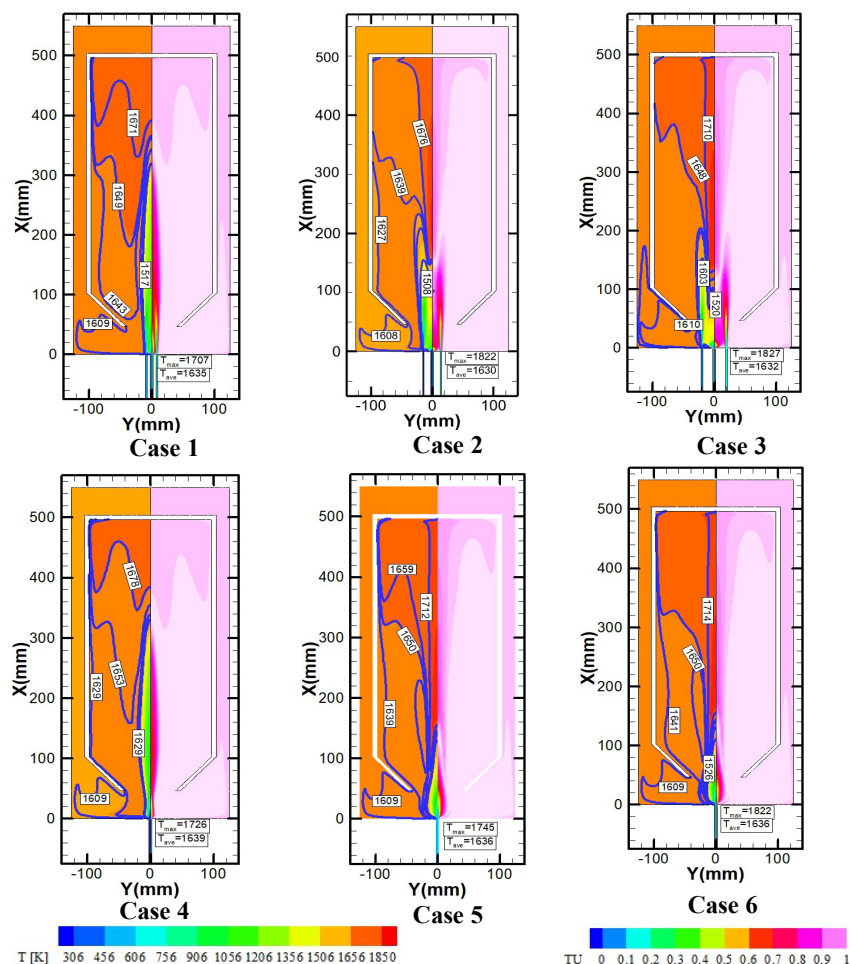
Max Temp (K)			
Case1	1707	Case4	1726
Case2	1822	Case5	1744
Case3	1827	Case6	1821
Average Temp			
Case1	1635	Case4	1638
Case2	1630	Case5	1636
Case3	1632	Case6	1636
ΔT			
Case1	71	Case4	87
Case2	192	Case5	108
Case3	195	Case6	185

در شکل ۷ توزیع دما، خطوط دما و یکنواختی آن در شش هندسه گفته شده نشان داده شده است. یکنواختی دما از رابطه (۵) محاسبه شده است [۲۲].

$$TU = 1 - \left| \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \right| \quad (5)$$

$\bar{T}$ دمای متوسط کوره و T_i دمای محلی است.

همان طور که از مقدار دمای نرمال شده مشاهده می شود، محدوده ی یکنواختی دما با کاهش فاصله ی بین ورودی سوخت و هوا بیشتر و بزرگ تر شده است. همچنین هرچه فاصله بین ورودی ها بیشتر می شود، محدوده ی یکنواختی دما کاهش می یابد. دمای بیشینه نیز با افزایش فاصله ی بین ورودی سوخت و هوا افزایش یافته است. در هندسه شماره ۱ و ۴ به علت افزایش میزان سرعت بازچرخش داخلی در تمام نواحی کوره، شاهد پخش دمای یکنواخت تری در خط میانی و قسمت انتهایی کوره هستیم، همچنین در هندسه یک و چهار، شاهد نزدیک تر بودن دمای میانگین به بیشینه و یکنواختی دمای بیشتر در تمامی نواحی کوره هستیم. اما درمجموع به علت نزدیک بودن میزان کمی ضریب بازچرخانی داخلی در هندسه های پیشنهادی، این ضریب تفاوت چشمگیری را در یکنواختی دمای کوره ایجاد نمی کند و فاصله ی بین دمای بیشینه و میانگین در پخش یکنواخت دما تعیین کننده تر است.



شکل ۸- توزیع دما، خطوط دما در سمت راست و یکنواختی آن در سمت چپ

Figure 8- Temperature distribution, temperature contours on the right and its uniformity on the left

یکنواختی گرمای آزاد شده حین واکنش از مزایای کوره احتراق بدون شعله در صنایع فولاد و شیشه است. این حرارت آزاد شده نشان‌دهنده‌ی پتانسیل انتقال حرارت است. تولید حرارت بیشتر در کوره‌های صنعتی یک هدف مهم در بهبود عملکرد کوره‌ها است. به همین علت میزان بیشینه‌ی حرارت آزاد شده در واحد حجم سلول محاسباتی در هر شش هندسه پیشنهادی با هم مقایسه شده است. با افزایش فاصله‌ی بین ورودی‌های سوخت و هوا، بیشینه حرارت آزاد شده ۵۹ درصد کاهش پیدا می‌کند. در حالت آرایش بعلاوه اما، تقریباً بیشینه حرارت آزاد شده با هندسه‌ی شماره یک برابر است. اما باز هم با افزایش فاصله ورودی سوخت و هوا، شاهد کاهش پتانسیل تولید حرارت در کوره می‌باشیم.

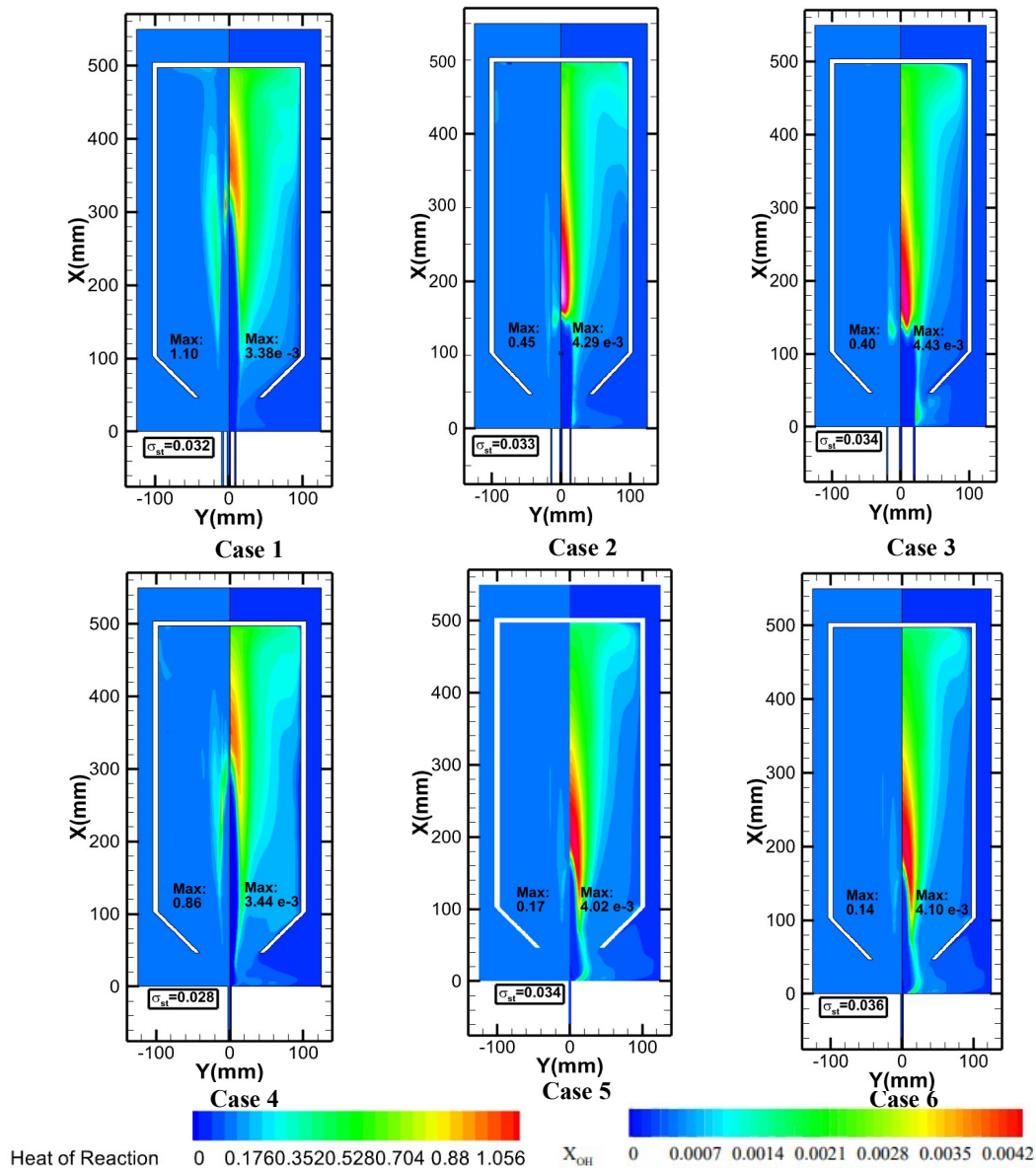
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، توزیع حرارت آزاد شده در سمت چپ نمودار و کسر مولی گونه‌ی OH در سمت راست آورده شده است. برای حرارت آزاد شده، انحراف از معیار استاندارد از رابطه‌ی (۶) محاسبه شده و نمایانگر انحراف از مقدار میانگین بوده و پایین بودن این پارامتر، پخش یکنواخت حرارت آزاد شده را نشان می‌دهد [۲۲].

$$\sigma_{st} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (HR_i - HR_{ave})^2}{N}} \quad (۶)$$

HR_i نشان‌دهنده میزان حرارت آزاد شده در سلول‌های محاسباتی حجم کوره، HR_{ave} مقدار میانگین حرارت آزاد شده در حجم کوره و N تعداد سلول‌های محاسباتی را نشان می‌دهد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که هندسه‌ی ۴ و ۱، کمترین انحراف از معیار را دارند و با افزایش فاصله‌ی بین سوخت و هوا، این مقدار بالا رفته است. نتیجه می‌شود در هندسه‌ی ۴ و ۱ حرارت به‌صورت یکنواخت‌تری آزاد شده و از منظر کیفیت محصولات در کوره-ی عملیات حرارتی مانند تولید قطعات فولادی، بهتر از سایر هندسه‌ها می‌باشند.

شکل ۸ نشان‌دهنده حرارت آزاد شده و توزیع کسر مولی گونه OH نیز است. گونه OH نمایانگر ناحیه واکنشی است و هرچه این‌گونه در ناحیه وسیع‌تری موجود باشد نشانه ایجاد احتراق در فضای بزرگ‌تری است [۲۹] بنابراین هرچه بیشینه غلظت گونه OH کمتر و توزیع آن وسیع‌تر باشد، احتراق بدون شعله با کیفیت‌تری خواهیم داشت. در هندسه‌ی شماره ۴ و ۱، شاهد کمترین میزان بیشینه‌ی رادیکال OH و پخش یکنواخت‌تر این گونه را شاهد هستیم. با افزایش فاصله بین ورودی سوخت و هوا، میزان بیشینه غلظت نقطه‌ای رادیکال OH بیشتر از حالات با فواصل کم هستیم.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مقدار گرمای واکنش در هندسه‌های ۱ و ۴ نسبت به بقیه‌ی هندسه‌ها در نقاط انتهایی کوره بیشتر است. با افزایش فاصله ورودی سوخت و هوا، محل شروع واکنش در حدود از $x = 100 \text{ mm}$ اتفاق می‌افتد و با کاهش فاصله میان ورودی‌های سوخت و هوا، واکنش‌ها دیرتر و در حوالی $x = 300 \text{ mm}$ شروع می‌شود، در نتیجه با افزایش فاصله‌ی میان ورودی سوخت و هوا، واکنش‌ها زودتر رخ داده و مانع از رسیدن واکنش‌های احتراقی به انتهای کوره می‌شود؛ که میزان و پخش حرارت آزاد شده نشان‌دهنده‌ی این موضوع است.



شکل ۹- توزیع حرارت آزاد شده در سمت چپ و کسر مولی گونه OH^* در سمت راست
Figure 9- Distribution of released heat on the left and molar fraction of OH^* species on the right

انتشار گونه‌های CO_2 ، CO و NO

کاهش آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای در راستای توجه به محیط‌زیست، موضوعی مهم در مباحث احتراقی است. در این بخش همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، به تحلیل انتشار آلاینده‌های NO و CO و گاز گلخانه‌ای CO_2 در مقطع دودکش خروجی پرداخته می‌شود.

انتشار گاز گلخانه‌ای CO_2 در تمامی هندسه‌ها تقریباً یکسان است و تغییر قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود. با کاهش فاصله‌ی بین ورودی سوخت و هوا، میزان تولید آلاینده NO کاهش یافته است. این امر به علت کاهش دمای بیشینه در کوره اتفاق افتاده است. همچنین میزان تولید NO در هندسه شماره ۲ و ۵ نسبت به ۱ و ۴، شیب افزایش زیادی دارد. علت این

پدیده رفتار نمایی ایجاد آلاینده NO از مکانیزم حرارتی زلدوویچ حین تغییرات دمایی است [۲۷]. به صورتی که با کاهش بیشینه دما از ۱۸۲۲ به ۱۷۰۷ کلوین، میزان تولید ناکس در واحد بخش در میلیون^۱ از ۹/۸۳ به ۲/۱۴ رسیده است. هندسه شماره ۱ و ۴ بهترین عملکرد را در عدم تولید آلاینده NO دارا هستند. همچنین در مقایسه با کوره می و همکاران که بدون سامانه بازچرخانی است، میزان تولید آلاینده NO، ۳۵ بخش در میلیون است، میزان تولید آلاینده NO کاهش یافته است. در پژوهش اخیر با تغییر آرایش ورودی سوخت و هوا و به کارگیری سامانه بازچرخانی داخلی، میزان تولید این آلاینده در تمامی هندسه‌های پیشنهادی، کاهشی گزارش شده است [۲۸].

جدول ۷- میزان آلاینده‌های CO و NO و گاز گلخانه‌ای CO₂ در مقطع دودکشTable 7- The amount of CO and NO pollutants and CO₂ greenhouse gas in the chimney section

Case Number	1	2	3	4	5	6
CO ₂ (%Mole F)	8.23	7.83	8.13	8.83	8.71	8.31
CO (ppm)	9.94	10.39	10.76	9.72	9.79	10.41
NO (ppm)	2.14	9.83	10.68	2.54	5.77	8.97

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر تغییر آرایش ورودی‌های سوخت و هوا و خصوصاً فاصله‌ی میان این ورودی‌ها در یک کوره‌ی بدون شعله بررسی شد و نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای شش طرح پیشنهادی ورودی سوخت و هوا مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه بر روی کوره‌ای برگرفته از کوره دالی که یک کوره در مقیاس آزمایشگاهی است، انجام شده است. کوره دالی یک کوره مرجع است و معمولاً به‌عنوان کوره مبنا در احتراق بدون شعله در نظر گرفته می‌شود و طراحی‌ها می‌توانند با تغییر روی کوره مبنا اعمال شوند. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

- نتایج نشان داد که میزان بیشینه ضریب بازچرخانی داخلی نسبت به کوره اولیه توسط دالی و همکاران [۱۱] در تمامی هندسه‌ها بیشتر از ۲/۵ برابر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با تغییر فاصله‌ی میان ورودی‌ها و کاهش قطرشان، میزان ضریب بازچرخانی داخلی در مقطع ۴۰۰ میلی‌متری، در مقایسه با بیشترین ضریب بازچرخانی محمدزاده، به میزان ۲/۱ برابر رشد داشته است. همچنین میزان بیشینه ضریب بازچرخانی در این مطالعه، نسبت به پژوهش التجایی و همکاران، ۹٪ رشد داشته است. این افزایش در نتیجه بزرگ‌تر شدن طول گردابه پایینی و دربرگرفته شدن فضای بزرگتری از کوره و کاهش فضای مرده است. همچنین با کاهش قطر ورودی شاهد افزایش تکانه ورودی سوخت و هوا هستیم. همچنین در حالت ضربدر، شاهد ضریب بازچرخانی بیشتری نسبت به فاصله‌های مشابه در آرایش بعلاوه هستیم که عامل این موضوع اختلاط بهتر سوخت و هوا و رسیدن مخلوط سوخت و هوا به کناره‌های هندسه‌ی مستطیلی است [۲۲،۲۳].
- مقدار بیشینه‌ی دما در هندسه‌ی شماره‌ی ۱ و ۴، از باقی حالات کمتر است. در حالت ضربدر، با کاهش فاصله‌ی میان ورودی سوخت و هوا از ۲۰ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر، میزان بیشینه دمای کوره از ۱۸۲۲ تا ۱۷۰۷ کلوین کاهش یافته است. در حالت آرایش بعلاوه نیز با کاهش فاصله‌ی بین ورودی سوخت و هوا از ۲۸ به ۲۰ و از ۲۰ به ۱۲ میلی‌متر، مقدار بیشینه دما از ۱۸۲۲ ابتدا به ۱۷۴۵ و بعد به ۱۷۲۶ کلوین کاهش یافته است. همچنین در هر دو حالت آرایش بعلاوه و ضربدر، با افزایش فاصله ورودی سوخت و هوا، اختلاف دمای بیشینه و دمای

^۱ ppm

میانگین کوره افزایش یافته و توزیع دما ناهمگن تر شده است. عامل این موضوع، بالاتر بودن ضریب بازچرخانی داخلی در تمامی نقاط کوره و همچنین بزرگتر بودن طول گردابه‌های پایینی و در برگرفتن فضای بیشتری از کوره در حالتی که دو ورودی به هم نزدیک‌تر هستند.

- با تحلیل توزیع گرمای واکنش درون کوره، معین شد که با افزایش میزان فاصله‌ی میان ورودی‌های سوخت و هوا، واکنش‌ها زودتر رخ داده و مانع از رسیدن واکنش‌های احتراقی به انتهای کوره می‌شود؛ که میزان و پخش حرارت آزاد شده نشان‌دهنده‌ی این موضوع است. میزان حرارت آزاد شده در حالتی که فاصله‌ی میان ورودی سوخت و هوا حداقل است، مقدار بیشینه‌ای دارد و این موضوع نمایانگر پتانسیل بالاتر این هندسه‌ها برای تولید حرارت هستند. همچنین مقدار انحراف از معیار حرارت آزاد شده در هندسه‌های پیشنهادی نشان می‌دهد که در هندسه‌ی شماره ۴، حرارت به‌صورت یکنواخت‌تری نسبت به باقی هندسه‌ها در حجم کوره آزاد می‌شود.
- میزان تولید آلاینده CO و گاز گلخانه‌ای CO₂ در تمامی هندسه‌های پیشنهادی تقریباً مقدار ثابتی است. مکانیزم حرارتی نیز اثر بسیاری روی تولید آلاینده NO دارد. طوری که با کاهش بیشینه دما از ۱۸۲۲ به ۱۷۰۷ کلوین، میزان تولید ناکس از ۹/۸۳ به ۲/۱۴ رسیده است و بهبود یافته است.
- در مجموع، هندسه شماره ۴ به‌علت فاصله‌ی کم میان دمای بیشینه و دمای میانگین و پایین‌تر بودن میزان آلاینده تولیدی نسبت به چهار هندسه دیگر، یکنواختی آزادسازی حرارت بهتر و بالاتر بودن میانگین دما نسبت به هندسه شماره ۱، به‌عنوان هندسه‌ی جدید پیشنهادی برای کوره‌ی مورد مطالعه انتخاب می‌شود.
- وجود شی مصرف کننده در کوره، می‌تواند رژیم کلی جریان را در کوره، تغییر دهد. نتایج حاصله در این مطالعه می‌تواند به انتخاب موقعیت مناسب برای قرارگیری مصرف کننده منجر شود. با قرار دادن مصرف کننده در کوره، انتقال حرارت قطعه مورد بررسی قرار گیرد. میدان جریان در شکل‌گیری رژیم احتراق بدون شعله و دمای بیشینه و میانگین در کوره، نقش مهمی دارد.

منابع

- [1] P. Li, J.C.H. Mi, B. B. Dally, F.F. Wang, L. Wang, Zh.H. Liu, Sh. Chen and C.G. Zheng "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] M. Mancini, P. Schwoppe, R. Weber, and S. Orsino, "On mathematical modelling of flameless combustion," Combustion and Flame, vol. 150, no. 1–2. Elsevier BV, pp. 54–59, Jul 2007.
- [3] A. Cavaliere and M. de Joannon, "Mild Combustion," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 30, no. 4. Elsevier BV, pp. 329–366, Jan 2004.
- [4] N. Krishnamurthy, P. J. Paul, and W. Blasiak, "Studies on low-intensity oxy-fuel burner," Proceedings of the Combustion Institute, vol. 32, no. 2. Elsevier BV, pp. 3139–3146, 2009.
- [5] X. Li, Z. Dai, Q. Guo, Q. Liang, and F. Wang, "Experimental and numerical study of MILD combustion in a bench-scale natural gas partial oxidation gasifier," Fuel, vol. 193. Elsevier BV, pp. 197–205, Apr 2017.
- [6] S. Xu, Y. Tu, P. Huang, C. Luan, Z. Wang, B. Shi, H. Liu and Zh. Liu "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.
- [7] A. E. E. Khalil and A. K. Gupta, "Swirling distributed combustion for clean energy conversion in gas turbine applications," Applied Energy, vol. 88, no. 11. Elsevier BV, pp. 3685–3693, Nov 2011.
- [8] Y. Tu, S. Xu, M. Xie, Z. Wang, and H. Liu, "Numerical simulation of propane MILD combustion in a lab-scale cylindrical furnace," Fuel, vol. 290. Elsevier BV, p. 119858, Apr 2021.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] B. B. Dally, A. N. Karpetis, and R. S. Barlow, "Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow," Proceedings of the Combustion Institute, vol. 29, no. 1. Elsevier BV, pp. 1147–1154, Jan 2002.

- [12] M. Ferrarotti, M. Fürst, E. Cresci, W. de Paepe, and A. Parente, "Key Modeling Aspects in the Simulation of a Quasi-industrial 20 kW Moderate or Intense Low-oxygen Dilution Combustion Chamber," *Energy & Fuels*, vol. 32, no. 10. American Chemical Society (ACS), pp. 10228–10241, Oct 2018
- [13] S. Pramanik and R. V. Ravikrishna, "Detached Eddy Simulation of syngas combustion in a reverse-flow configuration," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 51. Elsevier BV, pp. 27846–27863, Oct 2020.
- [14] 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.
- [15] 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
- [16] D. He, Y. Yu, Y. Kuang, and C. Wang, "Analysis of EDC Constants for Predictions of Methane Mild Combustion," *Fuel*, vol. 234, Part A. Elsevier BV, Sep 2022.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] R. Siegel, J. R. Howell, *Thermal radiation heat transfer*, Hemisphere Pub, Corp., Washing ton DC, 1992.
- [20] M. F. Modest, S. Mazumder, *Radiative heat transfer: Academic press*, 2021.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] I. Eltejaei, M. Zabetian., , "Simulation and experimental investigation of flameless combustion with the aim of proper placement of fuel and air inlet". May 2024. (in persian)
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] A. Mohammadpour, K. Mazaheri, and A. Alipour, "Reaction zone characteristics, thermal performance and NO_x/N₂O emissions analyses of ammonia MILD combustion," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 48. Elsevier BV, pp. 21013–21031, Jun 2022.
- [27] A. A. A. Abuelnuor, M. A. Wahid, S. E. Hosseini, A. Saat, Kh. M. Saqr, H. H. Sait and M. Osman "Characteristics of biomass in flameless combustion: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33. Elsevier BV, pp. 363–370, May 2014.
- [28] J. Mi, F. Wang, P. Li, and B. B. Dally, "Modified Vitiation in a Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution (MILD) Combustion Furnace," *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 1. American Chemical Society (ACS), pp. 265–277, Oct 2011.
- [29] J. Lee, S. Jeon, and Y. Kim, "Multi-environment probability density function approach for turbulent CH₄/H₂ flames under the MILD combustion condition," *Combustion and Flame*, vol. 162, no. 4. Elsevier BV, pp. 1464–1476, Apr 2015.

English Abstract

Investigating the effect of arrangements of air and fuel inlets on the performance of flameless combustion furnace

Hamed Jafari¹, Mohammad Zabetian Targhi^{2*}

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

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Zabetian@Modares.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2024/03/12, Received in revised form: 2024/04/19, Accepted: 2024/05/14)

The purpose of this study is to investigate the conditions governing a flameless combustion furnace with natural gas fuel. In this article, by changing the arrangement and distances of the four symmetrical air inlets from the central fuel inlet, The concept of eddy dissipation model with coefficient correction has been used to model combustion with reduced chemical kinetics DRM22. Two symmetrical cross arrangements "X" and "+" configuration, were determined to minimize the dead space in the furnace for air inlets. Lower limit of the air and fuel inlet distance was assumed to be 12 mm and the upper limit of this distance was 36 mm in the simulation. Most of all, by examining the combustion parameters, the proposed geometry was selected for the construction of the furnace. The recirculation factor (K_v) has been increased by 2.6 times compared to the base furnace. Also, the maximum temperature has decreased by 5% and the difference between the maximum and average temperature by 77 Kelvin compared to the basic furnace, and this indicates better temperature uniformity. Also, the maximum heat of reaction of specified point in the furnace has increased by 63% compared to the base furnace and indicates the higher potential of the furnace in heat treatment. It is possible to extend results of this research to natural gas industrial furnaces.

Keywords: Flameless combustion, inlet configuration, temperature distribution, X and + configuration