

مطالعه تجربی اثر گرمایش مستقیم سوخت گاز طبیعی در مشعلهای گازسوز بر تولید ذرات کربنی، تابش درخشانی شعله و انتشار آلاینده ناکس

محمد جلیلی مهر

دانشجوی دکتری-دانشگاه فردوسی مشهد
Jalilimehr@mail.um.ac.ir

محمد مقیمان

استاد-دانشگاه فردوسی مشهد
moghiman@um.ac.ir

حمید نیازمند

استاد-دانشگاه فردوسی مشهد
Niazmand@um.ac.ir

چکیده

تابش پایین در شعله های سوخت گاز طبیعی بر خلاف سوختهای مایع یکی از معضلات اصلی جایگزینی مشعلهای سوخت گاز طبیعی به جای مشعل های سوخت مایع در صنایع مختلف می باشد که سبب کاهش راندمان و افزایش مصرف سوخت می گردد. لذا در این مقاله با هدف افزایش تابش و درخشندگی شعله، اثر گرمایش مستقیم گاز طبیعی در مشعل های گاز سوز، بر تولید ذرات کربنی و تاثیر آن بر درخشندگی شعله و همچنین انتشار آلاینده های احتراقی به ویژه NOx بصورت تجربی مطالعه شده است. دبی جرمی سوخت ورودی (Ftotal) که در طول مطالعات ثابت در نظر گرفته شده است از دو مجرای مختلف با دبی های F1 و F2 وارد محفظه پیش احتراق می شوند. ابتدا سوخت F1 بصورت محوری و سپس سوخت خوراک F2، بصورت شعاعی در شعله حاصل از گاز F1 تزریق شده و اثر نسبت FR (F1/Ftotal) مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد در نسبت FR=10%، به دلیل احتراق ناقص سوخت خوراک در محفظه پیش احتراق و تشکیل دوده، تابش شعله به میزان 7% افزایش یافته و آلاینده NOx نیز 15ppm کاهش یافته است. ولی آلاینده CO بالاتر از حد استاندارد می باشد. اما در نسبت دبی سوخت FR=85% دمای پیشینه شعله ۲۰۰ درجه سانتیگراد و انتشار NOx نیز ۹ ppm کاهش و تابش شعله 15% افزایش داشته است. همچنین انتشار آلاینده CO نیز بسیار کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: گرمایش مستقیم سوخت متان، ذرات کربنی، تابش درخشانی، NOx

مقدمه

کاهش مصرف انرژی بعنوان یک اولویت اصلی در کشور، نیاز به طراحی سیستمهای احتراقی نوین و ورود تکنولوژیهای نو در این زمینه دارد. یکی از مهمترین مصرف کننده های انرژی در صنعت می توان به کوره های دوار در صنعت سیمان اشاره نمود که رتبه اول مصرف انرژی را در بین صنایع دارا هستند و در حدود ۱۲ الی ۱۵ درصد کل انرژی مورد استفاده در صنایع یک کشور را به خود اختصاص میدهند [۱]. کوره های سیمان در راندمان حرارتی پایین، در حدود ۲۰ الی ۵۰ درصد کار می کنند [۲] و تقریباً ۵۰٪ انرژی کل توسط محصولات احتراق از کوره های دوار سیمان خارج میشوند [۳]. با توجه به اهمیت انتقال حرارت تابشی در این کوره ها (و کوره های مشابه در صنایع ذوب فلزات سنگین، شیشه، آجر پزی و غیره) تحقیقات مختلفی به منظور افزایش راندمان حرارتی مشعلها از طریق افزایش تابش انجام شده است.

انتقال حرارت تابشی از شعله را می توان به دو دسته حرارتی و درخشانی تقسیم بندی کرد [۴]، در شعله غیر درخشان مانند شعله گاز طبیعی، دی اکسید کربن و بخار آب گونه های اصلی موجود در شعله و مهمترین گازهای جاذب و تشعشع کننده می باشند، اما این گونه ها باندهای تابشی بسیار

ضعیفی دارند که باعث می شوند تا شعله گاز طبیعی انتقال حرارت تابشی بسیار پایینی داشته باشد، شعله های درخشان علاوه بر دی اکسید کربن و بخار آب دارای ذرات کربن نیز هستند که این ذرات به عنوان جسم خاکستری با ضریب صدور بالا و نزدیک به جسم سیاه در ساختار شعله عمل کرده و انتقال حرارت تابشی از شعله را در مقایسه با شعله های غیر درخشان بهبود می بخشد.

بار و همکارانش [۵] با ارایه یک مدل ریاضی، تاثیر مستقیم دمای کوره را بر انتقال حرارت تابشی درون کوره را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش دمای کوره از ۱۰۰۰ درجه کلون به ۱۸۰۰ کلون سهم انتقال حرارت تابشی دو برابر می شود. آنها همچنین نشان دادند که افزایش ناگهانی قطر کوره، باعث سه برابر شدن نرخ انتقال حرارت تابشی در کوره می شود.

جوادی و مقیمان [۶] در سال ۲۰۱۲ به منظور افزایش تابش شعله، گاز متان ورودی به مشعل را تا ۳۶۰ درجه سانتیگراد گرم کردند. آنها نشان دادند که با افزایش دمای سوخت گاز طبیعی ورودی به مشعل تا دمای ۲۴۰ درجه سانتی گراد تغییرات قابل ملاحظه ای در شعله ایجاد نمی شود، اما با افزایش دمای گاز از ۲۴۰ درجه تا ۳۶۰ درجه سانتی گراد به علت تجزیه حرارتی سوخت گاز طبیعی و آزاد شدن گونه هایی مانند کربن که دارای ضریب صدور بالایی هستند، انتقال حرارت تابشی به میزان ۶۰ درصد افزایش می یابد.

ایسیها و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۵ با پیش گرم کردن سوخت LPG قبل از ورود به شعله از دمای محیط تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد نشان دادند که راندمان احتراق به میزان ۲۳ درصد افزایش و میزان انتشار آلاینده CO به میزان ۸۱ درصد کاهش می یابد.

پورحسینی و مقیمان [۴] به منظور تغییر عدد کربن سوخت (C/H) اثر همسوزی گاز - گازوییل را بررسی کردند نتایج نشان داد که با افزایش غلظت ذرات کربن، درخشندگی و سطح شعله در مقایسه با حالت بدون تزریق گازوییل به ترتیب ۳۸ و ۲،۵ برابر افزایش دارد. همچنین در نسبت همسوزی گازوییل به گاز بر مبنای ۱۰ درصد جرمی، تغییرات دمای شعله فقط ۹۵ درجه سانتی گراد بوده در حالیکه انتقال حرارت تابشی شعله ۵۲ درصد بهبود یافته است. علت اصلی افزایش انتقال حرارت تابشی در همسوزی گاز - گازوییل افزایش ضریب صدور تابش شعله در ناحیه مادون قرمز طیف امواج الکترومغناطیسی است، تزریق قطرات گازوییل باعث افزایش آلاینده های CO و NO به میزان ۴ و ۳۵ ppm می شود. همچنین آنها در مطالعات دیگری [۸] نشان دادند با تزریق ذرات پودر زغال سنگ آنتراسیت به داخل شعله گاز طبیعی، دلیل افزایش سطح واکنشی و بهبود درخشندگی آن (افزایش ضریب صدور تابش از شعله) انتقال حرارت تابشی و راندمان بویلر افزایش می یابد.

جو و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر همسوزی گاز متان با CO و H₂ بطور همزمان پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که این همسوزی

کوره و تجهیزات اندازه‌گیری به شرایط پایدار دمایی (گذشت زمان تقریبی یک ساعت)، مقادیر دمای محوری شعله، غلظت محصولات احتراق داخل دودکش و دمای محصولات احتراق در خروجی از کوره اندازه‌گیری شده است.

در شکل ۱ و ۲ بستر تست شامل، ساختمان داخلی کوره، مشعل با سیستم گرمایش مستقیم سوخت گاز طبیعی، با قابلیت تزریق مرحله ای سوخت و هوا با فواصل متفاوت و تجهیزات اندازه‌گیری نشان داده شده است. محفظه احتراق کوره اصلی دارای قطر ۵۰۰mm و طول ۱۵۰۰mm می‌باشد که با الهام از استاندارد EN676 انتخاب شده است [۱۲]. مشعل مورد استفاده از نوع مشعلهای گازسوز دمنده دار خودکار بوده که بیشینه ظرفیت حرارتی آن ۲۲۰ هزار کیلو کالری می باشد و بر حسب دبی سوخت و هوای ورودی قابل تنظیم می‌باشد. سوخت ورودی به محفظه پیش احتراق (F1) از یک لوله افقی به قطر ۱۵mm و هوای ورودی از یک ناحیه حلقوی بین لوله سوخت و لوله هم مرکز با آن با قطر داخلی ۱۰۰mm وارد محفظه پیش احتراق مشعل می‌شود. جهت اختلاط سوخت و هوا، در دهانه خروجی مشعل از یک شعله پخش کن با زاویه پخش ۴۵ درجه استفاده شده است. به منظور جلوگیری از هدررفت انرژی، محفظه پیش احتراق به صورت دو جداره ساخته شده است به گونه ای که شعله اولیه مشعل دمنده دار درون محفظه با قطر ۱۰۰ mm تشکیل شده و از محل حفره GAS2، مطابق شکل، سوخت خوراک (F2) به درون شعله تزریق میگردد، همچنین از حد فاصل بین دو جداره این محفظه، هوای ثانویه تزریق و با حرکت به سمت انتهای قطعه و ورود به کوره اصلی پیشگرم می‌شود و از تلفات حرارت به محیط نیز جلوگیری می‌کند.

باعث کاهش شدید طول شعله و افزایش دمای ماکزیمم شعله شده است که در نهایت آلایندة NOx به مقدار چشم گیری افزایش می یابد.

سکورا و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۰۷ با شبیه سازی احتراق نشان دادند که کاهش ماندگاری محصولات احتراق همراه با کاهش دمای احتراق، اصلی ترین عوامل موثر در تولید آلایندة NOx می شوند. تزریق مرحله ای هوای احتراق باعث کاهش دمای ماکزیمم شعله و در نتیجه کاهش مقدار آلایندة NOx می شود.

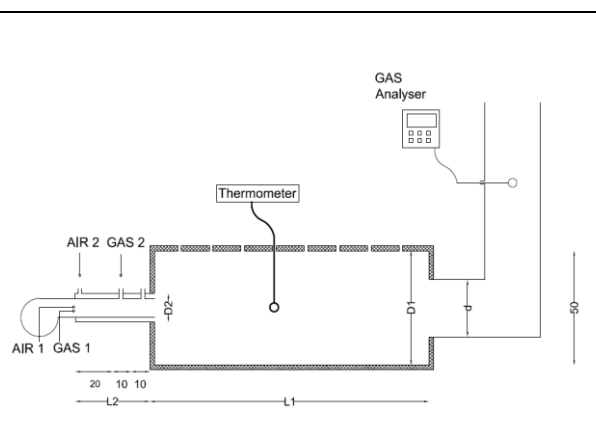
در تحقیقات گذشته نویسندگان [۱۱] با پیش گرمایش سوخت گاز ورودی به میزان ۷۶۰ درجه سانتی گراد با استفاده از المنتهای حرارتی و تجزیه حرارتی متان قبل از ورود به کوره نشان داده شد که دوده حاصل از تجزیه حرارتی پس از ورود به شعله باعث افزایش تابش به میزان ۶۰ درصد شد، همچنین نشان داده شد که افزایش تابش از شعله علاوه بر افزایش راندمان باعث کاهش دمای ماکزیمم شعله می شود و نتیجه آن نیز کاهش انتشار آلایندة NOx است.

اگر چه در سالهای اخیر روشهای مختلفی از جمله تزریق ذرات پودر زغال سنگ و تزریق سوخت مایع به شعله گاز طبیعی و یا استفاده از المنتهای حرارتی (تجزیه حرارتی سوخت) برای افزایش تابش درخشانی شعله و کاهش آلایندة NOx بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است، اما این روشها نیاز به تجهیزات و سیستمهای کنترل خاص دارند که از دیدگاه کاربردی این روشها بسیار پیچیده و پرهزینه می باشند.

در این پژوهش به منظور دستیابی به راهکاری ساده و با هزینه کمتر، سعی شده از مکانیزمی استفاده شود که پیش گرمایش سوخت، تجزیه حرارتی گاز و تولید ذرات کربنی، در محفظه پیش احتراق (شکل ۱) و با گرمایش مستقیم گاز قبل از تزریق به کوره انجام شود و نقش کربن آزاد شده بر درخشان شدن شعله (تابش درخشانی) و آلایندة های احتراقی بررسی شود. هدف از طراحی سیستم گرمایش مستقیم سوخت گاز، تولید کربن در اثر تجزیه حرارتی گاز طبیعی در محفظه پیش احتراق می باشد. همچنین در آزمایشها به بررسی تأثیردوده ناشی از احتراق پرسوخت در محفظه پیش احتراق بر فرایند احتراق پرداخته شده است.

بستر تست و روش آزمون

در این پژوهش با طراحی یک مشعل گازسوز صنعتی، مجهز به سیستم گرمایش مستقیم سوخت (در یک محفظه پیش احتراق مطابق شکل ۱)، اثر گرمایش مستقیم سوخت خوراک (گاز طبیعی) در احتراق دو مرحله ای بررسی شده است. هدف از گرمایش مستقیم سوخت خوراک (F2) در محفظه پیش احتراق، تولید ذرات کربن با مکانیزم تجزیه حرارتی و یا تولید دوده در اثر احتراق ناقص می باشد پس از آن نقش دوده تولید شده، بر تابش درخشانی، دمای محوری شعله و انتشار آلایندة ناکس مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور بستر تست مناسبی مطابق شکل ۲ طراحی و ساخته شده و آزمایشها در نسبت های مختلف دبی سوخت اولیه (F1) به دبی کل مشعل، (F1/Ftotal) انجام شده است. با توجه به گستره ظرفیت مشعل، آزمایشات برای دو دبی ثابت ۱۰.۲ و ۱۲.۶ مترمکعب در ساعت انجام شده و دبی سوخت اولیه F1 از صفر تا ۱۰۰٪ دبی کل تغییر داده شده است. ابتدا در هر آزمایش مقدار سوخت گاز اولیه (F1) و دبی هوای Air1 در محفظه پیش احتراق بر اساس حداقل میزان CO و حداقل هوای اضافه تنظیم شده است. سپس با ایجاد شرایط مناسب، مابقی سوخت F2 به صورت خوراک از دهانه GAS2 و مابقی هوای مورد نیاز احتراق از دهانه Air2 وارد شده است. پس از روشن شدن مشعل و رسیدن مجموعه



شکل ۱- الف) عکس کوره و مشعل مجهز به محفظه پیش احتراق،
ب) شماتیک بستر تست کوره و مشعل مجهز به محفظه پیش احتراق

مقدار دوده موجود در گاز است. با اندازه گیری حجم گاز عبوری از روی فیلتر میزان دوده بر حسب g/m^3 بدست می آید، که مقدار کسر حجمی دوده از تقسیم عدد دوده بر جرم حجمی دوده ($1800 g/m^3$) محاسبه می شود. با توجه به دبی ثابت پمپ وکیوم، عمل مکش در تستهای متعدد در بازه زمانی یکسان انجام شده است. جهت جلوگیری از بروز خطا قبل از هر آزمایش لوله مکش تمیز کاری می شد.

همچنین میزان تابش شعله (ناشی از درخشندگی آن) برای دبی های مختلف سوخت ورودی ($F1$ و $F2$) با استفاده از دستگاه پیرانومتر [14] اندازه گیری و در دماهای مختلف ثبت شده است. جهت اطمینان از رسیدن مجموعه کوره به شرایط پایدار و تکرار پذیری اندازه گیری ها، در هر آزمایش مقادیر متغیرهای مختلف در فواصل ۱۵ دقیقه اندازه گیری شده و پس از اطمینان از رسیدن کوره و تجهیزات اندازه گیری به شرایط پایدار، مقادیر آنها ثبت و گزارش شده است. به منظور بررسی تکرار پذیری آزمایش و جلوگیری از هر گونه انحراف و خطای احتمالی در اندازه گیریهای اولیه، اندازه گیریهای دما مجدداً انجام گردید و بیشترین اختلاف مشاهده شده نسبت به مقادیر متوسط آنها کمتر از ۱۰٪ بوده است. شایان ذکر است در تمام آزمایشهای انجام شده، درصد هوای اضافه، ۱۲ درصد ثابت نگه داشته شده است. با این مقدار هوای اضافه مشعل عملکرد مناسبی داشته و کمترین انتشار CO را دارد.

نتایج

در این مقاله به مطالعه اثر محفظه پیش احتراق در مشعل گازسوز دمنده دار بر انتشار آلاینده های احتراقی و تابش شعله پرداخته شده است. همچنین اثر نسبت دبی سوخت محفظه پیش احتراق به دبی کل مشعل ($F1/F_{total}$) و تغییر دبی خوراک سوخت $F2$ برای دو ظرفیت مختلف مشعل ($10.2 m^3/hr$ و $12.6 m^3/hr$)، بر توزیع محوری دما، تابش و میزان محتوی دوده در شعله و همچنین انتشار آلاینده های احتراقی مطالعه شده است.

در شکل ۲-الف توزیع محوری دما روی محور کوره و ناحیه پیش احتراق داخل مشعل برای نسبت سوخت ورودی به محفظه پیش احتراق به کل دبی سوخت از ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ نشان داده شده است. در حالت دبی گاز ۱۰۰٪، تمام گاز از دهانه $F1$ تزریق شده و منحنی دما مشابه مشعلهای معمولی می باشد. نتایج نشان می دهد با ورود سوخت $F1$ و هوای اولیه به محفظه پیش احتراق ابتدا در این ناحیه دما شدیداً افزایش می یابد. سپس با ورود سوخت خوراک $F2$ ، دمای محفظه پیش احتراق، کاهش شدیدی یافته که مقدار این کاهش به میزان حجم گاز $F2$ بستگی دارد.

در تست اول فقط ۱۰٪ گاز بعنوان سوخت اصلی و ۹۰٪ به عنوان خوراک تزریق شده است این افت دما به ۷۵۰ درجه میرسد. در این شرایط بدلیل کمبود هوای احتراق در این محفظه، احتراق به صورت پر سوخت و ناقص انجام شده که باعث تشکیل حجم زیادی دوده در گازهای احتراقی می گردد که پس از ورود به محفظه کوره با هوای ثانویه مخلوط، محترق و مجدداً دما افزایش یافته و احتراق کامل می شود. در تست دوم با تغییر نسبت دبی ها به میزان ۵۰٪ برای هر ورودی سوخت، افت دمای محفظه پیش احتراق از ۷۵۰ به ۳۸۰ درجه کلویین می رسد زیرا در این حالت سوخت سرد دوم با دبی کمتری تزریق شده و احتراق نسبت به حالت قبل در شرایط بهتری می باشد. در تست سوم نسبت دبی سوخت $F1/F_{total}$ به ۸۵٪ دبی کل افزایش یافته است. مشاهده می شود در این حالت دمای محفظه پیش احتراق (به دلیل تزریق فقط ۱۵٪ دبی سوخت از دهانه دوم)

جهت اندازه گیری دبی گاز از دو دبی سنج توربینی و جهت اندازه گیری و آنالیز گونه های موجود در محصولات احتراق و دما از دستگاه آنالیز گاز Testo 350XL استفاده شده است. پروب نمونه برداری استاندارد دستگاه به طول ۷۰۰ mm و تحمل دمایی ۱۲۷۲K دارای ترموکوپل نوع K و دارای شیلنگ مخصوص گاز SO_2/NO_2 می باشد. این دستگاه گونه های O_2 ، CO و NO را بطور مستقیم توسط سنسور اندازه گیری و گونه CO_2 و درصد هوای اضافه را بر حسب درصد اکسیژن اندازه گیری شده، محاسبه می نماید [13]. در محدوده اندازه گیری های انجام شده در این مقاله، دقت سنسورهای کالیبره شده مختلف دستگاه، در جدول ۱ آورده شده است. همچنین برای اندازه گیری دما در نقاط مختلف داخل کوره ۱۰ دریچه بازدید روی بدنه کوره در نظر گرفته شده است که امکان نمونه گیری گونه ها، ورود پروب ترموکوپل و اندازه گیری دما را میسر می سازد.

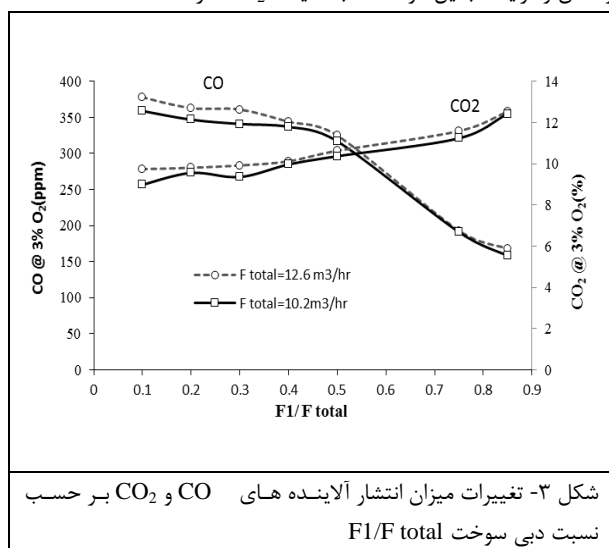
جدول ۱- مشخصات تجهیزات اندازه گیری

پارامترهای اندازه گیری شده	گستره اندازه گیری	دقت در محدوده استفاده
دما	$200 \pm 1^\circ C$	$\pm 0.4^\circ C$
	$900 \pm 1^\circ C$	$\pm 1^\circ C$
دبی سنج توربینی گاز	$Q_{min}=6.4$ $Q_{max}=40 m^3/hr$	$\pm 0.2\%$
	$0-25\%$	$\pm 0.2\%$
CO	ppm 0-1000	ppm ± 10
NO	ppm 0-3000	ppm ± 8
درصد هوای اضافه (محاسباتی)	----	± 0.8

برای اندازه گیری دمای محوری کوره از یک ترموکوپل نوع S با غلاف سرمایی با حداکثر دمای قابل اندازه گیری ۲۰۰۰K و دقت ۱K استفاده شده است. جهت ارزیابی شدت درخشندگی شعله از یک دستگاه پیرانومتر با سنسور فتوولتائیک [14] با قابلیت اندازه گیری طیف تابشی ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر که در محدوده طیف غالب تابش مرئی شعله های درخشنده می باشد [15]، استفاده شده است.

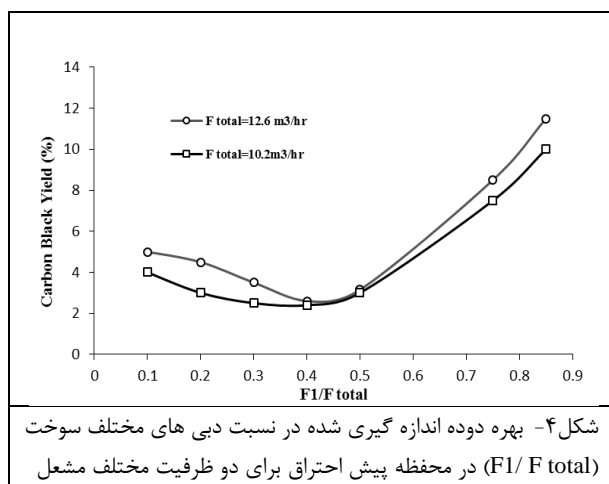
برای اندازه گیری دوده توسط دستگاه دودسنج AVL415 که با اندازه گیری میزان تیرگی فیلتر کاغذی مقدار دوده را تخمین می زند انجام شده است [16]. گازهای حاصل از احتراق ابتدا از داخل شعله توسط لوله سرمایی به قطر داخلی ۵ میلیمتر توسط پمپ وکیوم مکش می شود، سپس از داخل یک لوله مسی جهت خنک شدن عبور داده شده است. گازهای مکش شده از داخل کوره بعلاوه دمای زیاد ممکن است به دستگاه آسیب بزند به همین خاطر باید تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد سرد شود. در حین عبور گازها از لوله رابط به دلیل تقطیر آب در مسیر لوله حجم کل مخلوط محصولات احتراق تغییر می کند که باعث ایجاد خطا در آزمایشات می شود، لذا جهت جلوگیری از بروز این خطا در اندازه گیری های دوده، در مسیر لوله عبور گازها دریچه بازدید تعبیه شده است تا در صورت تقطیر آب، آزمایش مجدداً تکرار شود. دوده های موجود در محصولات احتراق بر روی فیلتر مخصوص جمع اوری شده و سطح فیلتر تیره می شود، میزان سیاهی سطح فیلتر که با روش انعکاسی اندازه گیری می شود، نشان دهنده

محفظه پیش احتراق دمای شعله در حالتی که نسبت $F1/F_{total}$ بیشتر است سطح دمای شعله بالاتری دارد و میزان دما ارتباط مستقیم با شدت واکنش و فرایند تبدیل گونه CO به CO_2 آلاینده دارد.



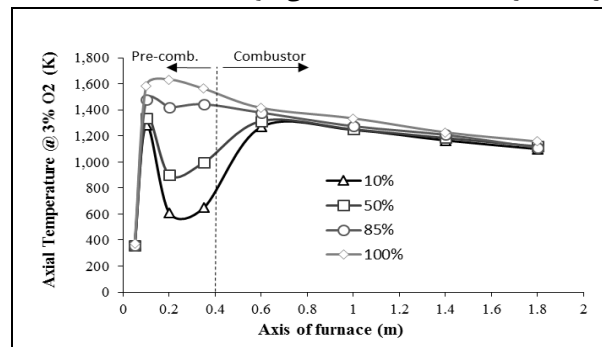
شکل ۳- تغییرات میزان انتشار آلاینده های CO_2 و CO بر حسب نسبت دبی سوخت $F1/F_{total}$

در شکل ۴ میزان بهره تولید کربن (نسبت میزان کربن تولید شده در شعله به کل کربن ورودی موجود در سوخت) ناشی از احتراق ناقص در نسبت های کم دبی سوخت $F1$ ($F1/F_{total} < 20\%$) و تجزیه حرارتی سوخت خوراک $F2$ در نسبت های بالاتر دبی ($F1/F_{total} > 60\%$) در محل خروجی محفظه پیش احتراق ($x=35cm$) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد در مقادیر کم $F1$ ، به دلیل احتراق ناقص ناشی از حجم بالای خوراک سوخت $F2$ نسبت به میزان هوای موجود در این محفظه (که فقط مناسب احتراق سوخت $F1$ است)، میزان بهره تولید دوده در حدود ۵٪ می باشد. اما با افزایش دبی سوخت اصلی $F1$ و کاهش دبی سوخت خوراک $F2$ ، میزان دوده تولیدی کاهش یافته و در نسبت دبی سوخت $F1/F_{total} \sim 50\%$ به مینیمم مقدار و در حدود ۲٪ است. سپس با افزایش بیشتر دبی سوخت اصلی ($F1/F_{total} > 60\%$) و شرایط بهتر احتراق و ایجاد دماهای بالاتر (مطابق شکل ۲)، به دلیل برخورد سوخت خوراک $F2$ با شعله دما بالا، بخشی از آن تجزیه شده و میزان دوده ناشی از تجزیه حرارتی مجدداً روند صعودی یافته و به بیشتر از ۱۰٪ کربن کل سوخت ورودی، افزایش می یابد.

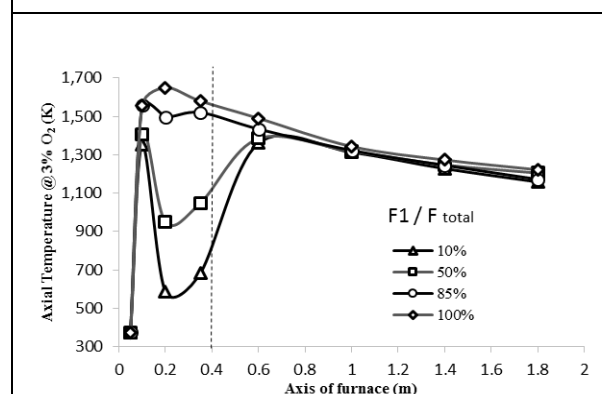


شکل ۴- بهره دوده اندازه گیری شده در نسبت دبی های مختلف سوخت ($F1/F_{total}$) در محفظه پیش احتراق برای دو ظرفیت مختلف مشعل

افت بسیار کمی (به کمتر از ۱۰۰ کلوین) می یابد. با توجه به دمای تجزیه گاز طبیعی که در تحقیقات آبانادر و همکاران [۱۷] تجزیه کامل در دمای ۱۳۵۰ درجه نشان داده شده است، انتظار می رود در صورت کنترل میزان هوای اضافه، در این حالت درصدی از گاز $F2$ با برخورد به محصولات احتراق در محفظه پیش احتراق بصورت مستقیم گرم و تجزیه حرارتی انجام و تولید دوده صنعتی^۱ می نماید. این دوده با ورود به کوره اصلی مجدداً محترق می شود. در شکل ۲ رفتار مشابهی در توزیع محوری دما برای ظرفیت بالاتر (12.6m3/hr) مشاهده می شود.



الف) توزیع محوری دما در طول کوره برای نسبت های مختلف سوخت اولیه به کل دبی سوخت در دبی کل سوخت 10.2 m3/hr

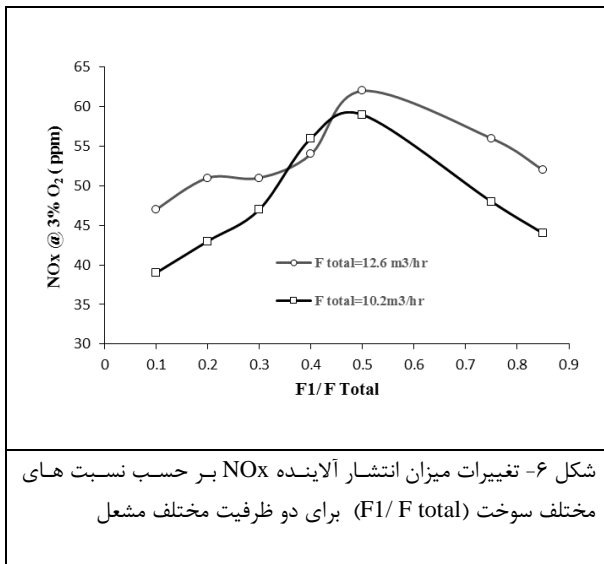


ب) توزیع محوری دما در طول کوره برای نسبت های مختلف سوخت اولیه به کل دبی سوخت در دبی کل سوخت 12.6 m3/hr

شکل ۲- توزیع محوری دما داخل کوره برای نسبت دبی های مختلف سوخت محفظه پیش احتراق ($F1$ به دبی کل)

در شکل ۳ اثر تغییرات دبی سوخت $F1$ و $F2$ بر میزان انتشار آلاینده های CO_2 و CO در خروجی محفظه احتراق اندازه گیری و نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود در دبی سوخت $F1=10\%$ و $F2=90\%$ ($F1/F_{total}=0.1$) به دلیل احتراق غنی از سوخت در محفظه پیش احتراق، میزان انتشار CO در حدود 370PPM می باشد که خارج از حد استاندارد (>200 PPM) می باشد. ولی با افزایش نسبت سوخت اولیه به ثانویه تا بیش از ۵۰٪، میزان انتشار CO سریعاً کاهش یافته بطوریکه در نسبت سوخت ($F1/F_{total}=0.85$) به حد مورد قبول می رسد. در این شرایط به دلیل احتراق کاملتر سوخت اولیه، تولید CO بسیار کمتر می باشد. نمودار دمای محوری در شکل ۲ الف و ب نشان می دهد که در

¹ Carbon black



شکل ۶- تغییرات میزان انتشار آلاینده NOx بر حسب نسبت های مختلف سوخت (F1/ F total) برای دو ظرفیت مختلف مشعل

نتیجه گیری

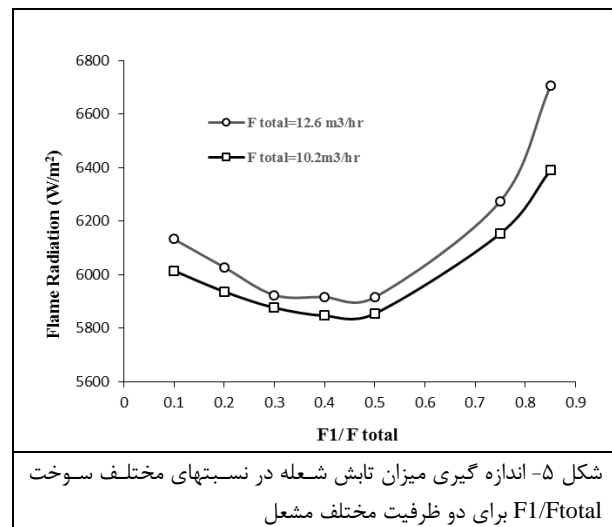
- تزریق مرحله ای سوخت باعث کاهش دمای ماکزیمم شعله می شود.
- زمانی که میزان سوخت خوراک کمتر از ۲۰ درصد از کل دبی سوخت باشد، میزان تولید کربن زنده به میزان بیش از ۱۰٪ افزایش می یابد.
- ذرات کربنی در شعله باعث افزایش تابش می شود.
- تابش از شعله باعث کاهش دمای ماکزیمم شعله و نتیجه آن کاهش انتشار NOx است.

مراجع:

References

- [1] N.A. Madlool, R. Saidur, N. Rahim, *Investigation of Waste Heat Recovery In Cement Industry: Case Study* Int. Engineering and Technology Vol. 4, No. 5, pp. 665-667, (2012).
- [2] S. Karelak, A. D. Leontaritis, G. Panousis, E. Bellos, E. Kakaras, *Energetic And Exergetic analysis of waste heat recovery systems in the Cement Industry, Laboratory of Steam Boilers and thermal plants*, National Technical University of Athens, Greece, (2012).
- [3] P. Darabi, *Mathematical Model for Cement Kilns Master of Science Thesis*, University of British Columbia, (2006).
- [4] S.H. Pourhoseini and M. Moghiman, *An experimental study on the effect of synchronous combustion of gasoil on luminosity and radiative heat transfer of natural gas flame*, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, NO. 15, PP. 11-16, 2015 (In persian).
- [5] P.V. Barr, J. K. Brimacombe, A. P. Watkinson, *Heat-Transfer Model for the Rotary Kiln: Part II. Development of the Cross-Section Model*, Metallurgical Transactions B Vol. 20, pp. 403-419, 1989.
- [6] S. M. Javadi and M. Moghiman, *Experimental Study of Natural Gas Temperature Effects on the Flame Luminosity and NO Emission in a 120 kW Boiler*, International journal of spray and combustion dynamics, Vol. 4, NO. 2, (2012).
- [7] L. Aisyaha, D. Rulianto, C. S. Wibowoa, *Analysis of the Effect of Preheating System to Improve Efficiency in LPG-fuelled Small Industrial Burner*, Energy Procedia, Energy Procedia 65, 180 – 185 (2015).
- [8] S.H. Poorhoseini and M. Moghiman, *Effect of pulverized anthracite coal particles injection on thermal and radiative characteristics of natural gas flame: An experimental study*, Fuel, Vol. 140, NO. 7, PP. 44-49, 2015.

در شکل ۵ با تغییر نسبت دبی سوخت F1 و F2 میزان تابش درخشانی شعله به دیواره کوره با استفاده از دستگاه پیرانومتر اندازه گیری شده است [۱۴]. همانطور که دیده می شود هنگامیکه دبی سوخت F1 در حدود ۱۰ الی ۲۰ درصد دبی کل است به دلیل تولید دوده و از طرف دیگر افزایش حجم شعله میزان تابش دریافتی از شعله زیاد و در حدود 6000 W/m^2 می باشد. با افزایش نسبت سوخت اولیه F1، بدلیل کاهش محتوی دوده شعله، شار تابشی روند کاهشی یافته و در نسبت $F1/F_{total} \sim 50\%$ به کمترین مقدار خود یعنی حدود 5800 W/m^2 رسیده است. اما با عبور از نقطه ۵۰٪ و افزایش نسبت F1/Ftotal تا حد ۰.۸۵ بدلیل افزایش حجم دوده شعله، شار تابشی روند صعودی یافته و به حدود 6600 W/m^2 رسیده است. تحقیقات گذشته [۱۱] نیز نشان می دهد که وجود ذرات کربن در شعله باعث افزایش تابش از شعله شده است.



شکل ۵- اندازه گیری میزان تابش شعله در نسبت های مختلف سوخت F1/Ftotal برای دو ظرفیت مختلف مشعل

در شکل ۶ رفتار انتشار آلاینده NOx ناشی از تغییرات دبی سوخت F1 و F2 نشان داده شده است مهمترین روش تولید NO در شعله گاز طبیعی تولید فنیومور NO می باشد که در ناحیه دما بالای شعله تولید می شود، همانطور که در شکل دیده می شود در دبی های ۱۰ الی ۲۰ درصد سوخت F1 میزان انتشار آلاینده NO کم و در حدود ۳۸ PPM می باشد و با افزایش دبی سوخت ۱ به میزان ۳۰ - ۵۰ درصد میزان انتشار NO افزایش و به حد ۵۸ PPM می رسد. پس از آن با افزایش دبی سوخت ۱ به میزان ۸۵ درصد، مجدداً میزان انتشار NO به حد ۴۳ PPM کاهش می یابد.

این موضوع با رفتار درخشندگی شعله در شکل ۵ توجه می گردد. هنگامیکه در دبی های کم سوخت F1 تابش از شعله زیاد باشد، تابش زیاد از شعله باعث سرد شدن نواحی دما بالای شعله می گردد اگر در شعله سطوحی که دمای بالا دارند کاهش یابند زمان ماندگاری گونه های میانی در این نواحی نیز کم شده و نتیجه آن کاهش انتشار آلاینده NOx می باشد که در تحقیقات گذشته [۱۱] نیز این مسئله ذکر شده است.

در نهایت می توان گفت انتشار آلاینده NOx که به سطوح دمای بالای شعله و زمان ماند محصولات احتراق در نواحی دما بالا وابسته است با میزان تابش رابطه عکس دارد. تابش از شعله، باعث سرد شدن نواحی دما بالای شعله می گردد که پیامد آن کاهش انتشار آلاینده های NOx است.

- [9] A. Seongpil Joo, A. Jisu Yoon, A. Jeongjin Kim, A. Minchul Lee, A. Youngbin Yoon, *NOx emissions characteristics of the partially premixed combustion of H₂/CO/CH₄ syngas using artificial neural networks*, Applied Thermal Engineering, Vol. 80, , PP. 436-444, (2015)
- [10] D. Sequera and A. Agrawal, Emissions and acoustics measurements in a Low-Swirl Burner, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada (2007).
- [11] M. Jalilimehr, H. Behzadan, S. M. Javadi Mal Abad, M. Moghiman, and H. Niazmand. *Investigating the Effects of Natural Gas Preheating on Soot Formation, Flame Luminosity, and NOX Emissions: A Combined Experimental and Numerical Approach*, Heat Transfer Asian Research, doi:10.1002/htj.21249, (2016).
- [12] BS EN 676 2003 Automatic forced draught burners for gaseous fuels, European Standards (2003).
- [13] Testo Inc. Short Operation Instruction Manual (testo 350 M/XL): Rev.11/03 Instrument Software Version 1.30, Accessed on 10 July 2015; <http://www.testo.com>.
- [14] F. Nagamine, R. Shimokawa, Y. Miyake, M. Nakata, K. Fujisawa *Calibration of Pyranometers for the photovoltaic device field*, Applied Physics, 29: 516-521 (1990).
- [15] Y.H. Lia, C.Y. Wub, Y.C. Chao *Concept and combustion characteristics of the high-luminescence flame for thermophotovoltaic systems*, Proceedings of the Combustion Institute, 33: 3447-3454 (2011).
- [16] AVL smoke measurement, AVL LIST GMBH, Graz 2001.
- [17] A. Abánadesh*, E. Ruiza, E.M. FerrueIoa, F. Hernández0, *Experimental analysis of direct thermal methane cracking*, international journal of hydrogen energy, 36: 12877-