

بررسی آزمایشگاهی اثر ابعاد هندسی محفظه احتراق بر انتشار آلاینده ها و راندمان احتراق

محمدجلینی^{۱*}، کاظم بشیرنژاد^۲

دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

(*نویسنده مخاطب Mmdjoleini@gmail.com)

چکیده

در این مطالعه اثر پارامترهای مختلف از جمله ابعاد هندسی محفظه احتراق و میزان دبی جرمی سوخت بر میزان غلظت آلاینده های خروجی از کوره و راندمان احتراق مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دو عدد کوره احتراق آزمایشگاهی با ابعاد مختلف طراحی و ساخته شده است. کوره های آزمایشگاهی با مشعل گازوئیلی به وسایل اندازه گیری مختلف از جمله ترموکوپل، دبی سنج سوخت و آنالیز کننده گاز مجهز شده اند. آنالیز کننده گازهای خروجی از کوره قادر به اندازه گیری گازهای مختلف از جمله CO, CO₂, NO, NO₂, HC می باشد. جهت اطمینان از نتایج آزمایشگاهی کلیه تجهیزات آزمایشگاهی کالیبره شده و تکرار پذیر بودن آزمایشها مورد توجه قرار گرفته است. اندازه گیری ها نشان می دهند که در هر دو کوره دمای شعله ابتدا بسرعت افزایش یافته و به مقدار ماکزیمم خود رسیده و سپس به آرامی کاهش می یابد که مقادیر دما به میزان دبی ورودی مخلوط سوخت و هوا وابسته می باشد. همچنین با افزایش دبی میزان انتشار NO_x در هر دو کوره افزایش یافته اما در کوره با ابعاد کوچکتر این افزایش شدیدتر بوده است. ضمناً غلظت CO در کوره ها با افزایش دبی ابتدا کاهش یافته و بعد افزایش می یابد راندمان احتراق نیز با افزایش دبی سوخت کاهش یافته و این روند کاهش در کوره کوچک شدیدتر می باشد.

واژه های کلیدی: ابعاد کوره- اکسیدهای نیتروژن- مونوکسید کربن- راندمان احتراق

۱- مقدمه

تحقیق در زمینه بهینه کردن سیستمهای حرارتی برای داشتن کارایی بالاتر و انتشار آلاینده های کمتری به سبب افزایش انتشار NO_x و دیگر گازهای گلخانه ای از قبیل CO₂ در دو دهه اخیر افزایش چشمگیری داشته است. تا پیش از این گاز دی اکسید کربن که یکی از اصلی ترین محصولات احتراق است بی ضرر انگاشته می شد اما با پیشرفت تحقیقات مشخص شده است که CO₂ یکی از مهمترین منابع در ایجاد پدیده گلخانه ای و اثرات ناشی از آن است [۱]. آنچه به عنوان آلاینده های حاصل از احتراق شناخته شده شامل اکسیدهای ازت، اکسیدهای کربن، هیدروکربنهای نسوخته، دوده، اکسیدهای گوگرد، ذرات غبار و خاکستر می باشند.

گاز سمی منواکسید کربن که از احتراق ناقص سوخته های کربن دار بدست می آید در انتقال خون ایجاد اختلال می نماید زیرا میل ترکیبی شدیدی با گلبولهای قرمز خون دارد که معمولاً در احتراق ناقص و ناحیه ای از شعله که دمای کمتری دارد منتشر

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک- تبدیل انرژی

^۲ استادیار گروه مکانیک- دانشکده مهندسی- دانشگاه آزاد اسلامی- واحد مشهد

می شود و نیز می تواند در اثر افزایش بیش از حد هوای وارد شده به محفظه احتراق تولید شود. از سمی ترین و خطرناکترین آلاینده های هوا، اکسیدهای نیتروژن می باشند NO و NO₂ که با هم NO_x نامیده می شوند به شدت در تولید مه دود فتوشیمیایی و ازن در هوای شهری و در کل تروپوسفر نقش مهمی ایفا می کند همچنین NO_x در واکنشهای زنجیره ای مربوط به حذف ازن از استراتوسفر تاثیر زیانباری داشته که باعث افزایش عبور اشعه فرابنفش به سطح زمین می گردد [۲]. کمینه کردن تولید NO_x یکی از مهمترین موضوعات بحث احتراق شده است که علیرغم تحقیقات بسیار زیادی که در راستای کاهش انتشار آن انجام شده است هنوز هم نیاز به مطالعات بیشتر بالخصوص در زمینه طراحی وسایل احتراقی با تولید آلاینده کمتر احساس می شود.

تحقیقات نشان می دهد که بیشترین میزان انتشار NO_x مربوط به مکانیزم حرارتی یا زلدویج است که انتشار آن در دماهای بالاتر از ۱۸۰۰ K بصورت تابع نمایی افزایش می یابد. در همین راستا روسلیاکوف و همکارانش طی تحقیقات گسترده خود یک رابطه نمایی جهت نمایش ارتباط میزان انتشار NO_x با افزایش درجه حرارت در منطقه احتراق فعال ارائه نموده اند [۳].

هیروتاتسو و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با اعمال تغییراتی در نحوه ورود هوا از طریق نازلها و تغییر تعداد و قطر این نازلها چگونگی توزیع دما و تاثیر آن بر میزان انتشار NO_x را در یک کوره بطول ۴۲۰ میلی متر و قطر ۳۸ میلی متر را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که با کاهش قطر نازل ورود هوا، سرعت آن افزایش یافته و میزان اختلاط سوخت و هوا بیشتر شده در نتیجه ناحیه دما بالا به سمت مخالف جریان یعنی به سمت ابتدای کوره انتقال یافته و سطح آن کم شده است و با افزایش قطر نازل، سطح ناحیه دما بالا ضمن افزایش، از دهانه کوره دورتر شده است. بر همین اساس نتایج نشان می دهد که با افزایش قطر ورودی هوا میزان انتشار NO_x حرارتی که به شدت به دما و سطح ناحیه دما بالا بستگی دارد افزایش یافته است. آنها بوضوح نشان دادند که ضریب مولی NO در خروجی با زمان ماند محصولات احتراق در ناحیه دما بالا وابستگی شدید دارد [۴].

ایشان در بررسی دیگری اثر شکل محفظه احتراق با نصب یک تیغه در درون محفظه احتراق و تغییر محل و نوع آن، تاثیر آنرا با درجه حرارت (T_{MAX}) و میزان انتشار NO_x مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که با دور کردن تیغه از دهانه ورودی کوره مقدار ماکزیم دما کمی افزایش یافته ولی سطح ناحیه دما بالا کمتر می شود. نتایج نشان می دهد انتشار NO_x به سطح ناحیه دما بالا و زمان ماند محصولات در این ناحیه بستگی شدید دارد در نتیجه مقدار انتشار NO_x کاهش یافته است [۵-۶].

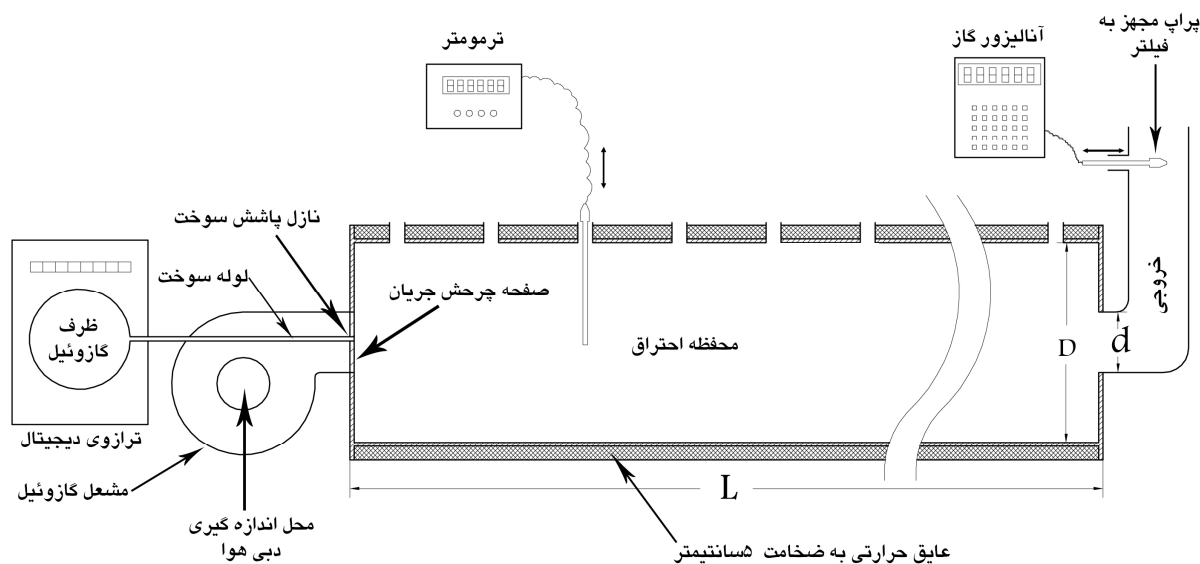
مقیمان تولید و نشر آلاینده ها در کوره های تونلی سوخت مایع را بر روی یک کوره استوانه ای بطول ۴/۲۵ متر و قطر ۰/۸ متر مورد مطالعه آزمایشگاهی و عددی قرار داده است در این بررسی نشان داده شده است که طول کوره تونلی اثر قابل توجهی بر انتشار آلاینده های خروجی دارد بطوریکه با افزایش طول کوره کسر جرمی CO و دوده کاهش یافته و غلظت گاز NO ابتدا بسرعت تا یک ماکزیم افزایش یافته و سپس کمی کاهش پیدا می کند. کاهش کسر جرمی منواکسید کربن و دوده در اثر افزایش طول کوره می تواند به علت فراهم شدن زمان بیشتر برای اکسیداسیون و احتراق کامل آنها در داخل کوره باشد. افزایش ابتدایی غلظت اکسیدهای نیتروژن در اثر افزایش طول کوره می تواند به دلیل افزایش افت فشار، کاهش سرعت گازهای احتراقی، افزایش زمان اقامت سوخت در کوره و افزایش دما در اثر احتراق کامل آن و در نتیجه ایجاد شرایط مناسب برای تشکیل NO حرارتی باشد. کاهش مقدار NO در طولهای نسبتاً زیاد کوره می تواند در اثر کاهش دما به علت افزایش انتقال حرارت از جداره، انتقال حرارت تابشی و جریان معکوس گازهای نسبتاً سرد انتهای کوره در اثر حرکت چرخشی گازهای احتراقی باشد [۷].

بنابراین پارامترهای هندسی و جریانی محفظه احتراق بر نحوه توزیع دما و میزان انتشار آلاینده های خروجی از کوره تاثیر گذار است. با وجودی که تحقیقات مختلفی توسط محققین و پژوهشگران مختلف انجام شده است ولی به دلیل تنوع زیاد در سیستمهای احتراقی و پارامترهای متعدد موثر بر احتراق سوخت مایع نیاز به نتایج آزمایشگاهی می باشد. در این تحقیق، اندازه گیری عوامل هندسی محفظه احتراق و مشخصات سوخت و هوای ورودی بر میزان انتشار آلاینده های خروجی از کوره و راندمان احتراق مورد بررسی قرار گرفته است. که این مهم به منظور یافتن بهترین ارتباط بین ابعاد محفظه احتراق با نوع مشعل

مورد استفاده به خاطر داشتن راندمان بالاتر و الیاندگی کمتر در صنایع مختلف از جمله کارخانجات سیمان و نیروگاهها انجام شده است.

۲- ساختمان کوره و وسایل اندازه گیری

دو عدد کوره آزمایشگاهی استونه ای با مشخصات طبق جدول شماره 1 طراحی و ساخته شده اند. جنس بدنه کوره از فولاد AISI 316 ساخته شده است که در برابر دماهای بالا مقاوم است. در طراحی کوره ها نسبت قطر به طول برای هر دو کوره یکسان در نظر گرفته شده است. علت این نکته در طراحی کوره ها به این دلیل بوده است که عدد بدون بعد نسبت قطر به طول برای هر دو کوره یکسان باشد ($L/D=const$) تا بتوان اثر پارامترهای مختلف دیگر را بررسی نمود. جهت جلوگیری از بروز خطرات برای آزمایش کننده و به منظور جلوگیری از انتقال حرارت به محیط و کنترل دمای کوره و ایجاد شرایط ماندگار بدنه کوره با پشم سنگ ۱۲۶۰ به ضخامت ۵cm پوشانیده شده است. برای محافظت عایق از پارچه نسوز بعنوان روکش استفاده شده است.



شکل ۱- شماتیک کوره های مورد مطالعه

همانطور که مشاهده می شود تعدادی حفره جهت اندازه گیری دما در راستای محور و دیگر آنالیزها بر روی کوره ها تعبیه شده است که از این محل می توان وضعیت شعله را نیز مشاهده نمود. در جدول ۱ مشخصات کامل کوره های مورد استفاده آورده شده است.

مشعل مورد استفاده با توان حداکثر $100000 \frac{KCAL}{HR}$ از نوع فشاری است این مشعل، سوخت ورودی را از طریق یک نازل با مشخصات گفته شده در جدول ۱ به صورت پودر پاشش می نماید. میزان هوای مورد نیاز جهت احتراق توسط دریچه هوای مشعل قابل تنظیم است اختلاط سوخت و هوا به کمک صفحه مخصوص (موسوم به شعله پخش کن) و از طریق چرخاندن هوای ورودی فراهم می شود. آزمایشات با سوخت گازوئیل که در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد دارای لزجت ۵/۵-۱/۵ سانتی استوک است، انجام می شود.

جدول ۱- مشخصات کوره ها و مشعل مورد استفاده

سایز کوره	طول L mm	قطر D mm	طول دودکش mm	ظرفیت نازل gph	زاویه پاشش نازل	درصد هوای اضافی
کوره A	۱۷۰۰	۳۲۰	۱۰۵۰	۰.۸۵	۶۰	۵۷
کوره B	۲۱۵۰	۴۰۰	۱۰۵۰	۰.۸۵	۶۰	۵۷

آنالیز دما در راستای محور توسط یک ترموکوپل نوع S که در برابر دماهای نسبتاً زیاد مقاوم است انجام شده است. این ترموکوپل که توسط یک غلاف سرامیکی محافظت می شود به یک صفحه نمایش دیجیتال متصل است که دما را مستقیماً بر حسب درجه سانتی گراد نشان می دهد. ترمومتر مورد استفاده از نظر کالیبره بودن مورد بررسی قرار گرفت. جهت آنالیز آلاینده های احتراقی و اندازه گیری دمای محصولات احتراق در محل نشان داده شده در دودکش در شکل ۱ توسط دستگاه آنالیزور گاز مدل TESTO 350 XL انجام شده است. پراپ این دستگاه مجهز به فیلتر مخصوص با تحمل دمایی ۷۰۰ درجه سانتی گراد است. این دستگاه کالیبره شده و از دقت بسیار بالایی برخوردار است. این دستگاه قابلیت اندازه گیری پارامترهای گفته شده در جدول ۲ را دارد. آزمایشات در هر کوره در سه دبی مختلف انجام شده است که در جدول ۲ آورده شده است. میزان هوای اضافی در کل آزمایشات ثابت بوده است زیرا در این دبی کمترین میزان انتشار CO وجود داشته است. آزمایشات در هر دبی چندین بار انجام شده و میزان متوسط آن در هر دبی آورده شده است تا میزان خطا به حداقل برسد. در ابتدای راه اندازی کوره بدلیل شرایط ناپایدار حاکم بر کوره آنالیزها تغییرات بسیار زیادی داشت پس از بررسیهای لازم مشخص شد که کوره حدوداً یک ساعت پس از راه اندازی به شرایط پایدار می رسد. بهمین خاطر تمامی آنالیزها پس از رسیدن کوره به شرایط پایدار انجام شده است. ضمناً در طول زمان آزمایش توجه به دمای محیط و اندازه گیری منظم آن بسیار حایز اهمیت است چون تغییر دمای محیط بر روی نسبت هم ارزی تاثیر گذار است بهمین منظور سعی شده است که دمای محیط در حدود ۴۰ درجه سانتی گراد نگه داشته شود به منظور جلوگیری از تاثیر دمای بدنه کوره بر روی دمای هوای محیط توسط یک فن تهویه دمای اتاق تنظیم می گردید با این وجود میزان نوسان آن در حدود ± 3 درجه است.

جدول ۲- میزان انتشار آلاینده ها در دبی های مختلف در کوره A

پارامترها	واحد	Q1=3.17 (litr/hr)	Q2=3.5 (litr/hr)	Q3=3.7 (litr/hr)
O ₂	درصد	۷/۶۶	۷/۶۵	۷/۵۵
CO	PPM	۱۲۷	۱۱۵	۱۲۲
NO _x	PPM	۶۶	۷۸	۸۹
CO ₂	درصد	۹/۹۳	۹/۹۶	۱۰/۰۸
H ₂	PPM	۶۲	۱۱۴	۱۵۳
EAIR	درصد	۵۷/۶	۵۷/۳	۵۷/۴
FT	°C	۳۶۷	۴۶۰	۴۸۲
EFF	درصد	۷۹/۷	۷۴/۷	۷۳/۸
AT	°C	۳۸/۳	۴۱/۱	۴۳/۹

۳- تعیین خطای اندازه گیریها

برای اطمینان از داده های اندازه گیری شده تمامی وسایل اندازه گیری در آزمایشگاههای معتبر و مورد تایید اداره استاندارد کالیبره شده اند. با این وجود احتمال خطاهای تصادفی در حین آزمایش وجود دارد، لذا برای هر آزمایش، اندازه گیری سه بار

تکرار شده و سپس میانگین حسابی داده ها محاسبه و به عنوان داده نهایی استفاده شده است. برای محاسبه انحراف معیار مقدار میانگین از فرمول زیر استفاده شده است [۸].

$$\sigma_m = \sigma / n^{0.5} \quad (1)$$

که σ انحراف معیار مجموعه اندازه گیریها، σ_m انحراف معیار مقدار میانگین و n تعداد اندازه گیریها می باشد و برای محاسبه مقدار درصد عدم قطعیت (M) رابطه زیر به کار برده شده است.

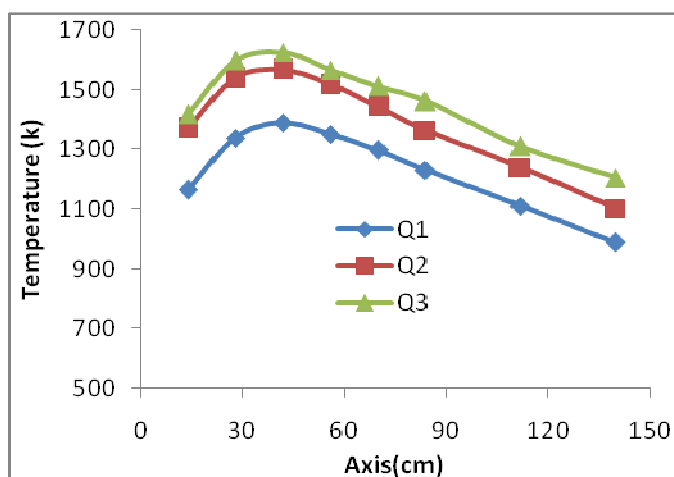
$$M=100 \sigma_m/x \quad (2)$$

که x مقدار میانگین حسابی داده های آزمایشگاهی می باشد. نتایج تحلیل آماری داده های آزمایشگاهی نشان می دهد که در تمامی پارامترهای اندازه گیری شده میزان خطای آماری کمتر از ۷٪ بوده است.

۴- نتایج

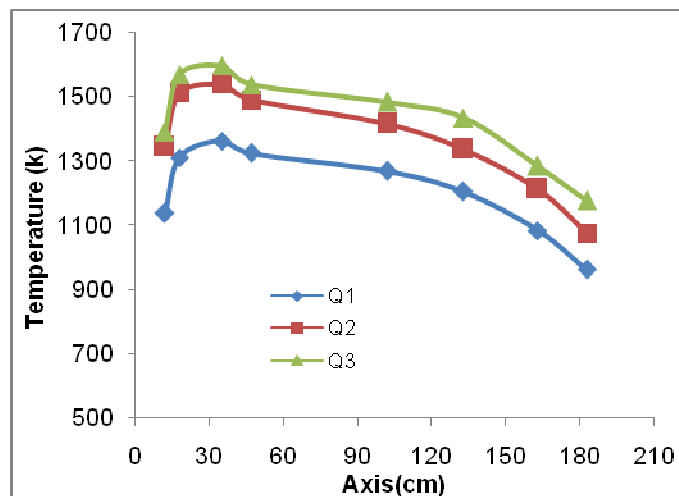
جهت بررسی اثر شکل محفظه احتراق بر چگونگی توزیع درجه حرارت و میزان تشکیل آلاینده ها، اندازه گیری بر روی دو کوره مختلف که در شکل ۱ نشان داده شده انجام شده است.

شکل ۲ و ۳ تغییرات دما در داخل دو کوره A و B را برای سه دبی مختلف نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش دبی میزان درجه حرارت بشکل محسوسی در دو کوره افزایش می یابد. همچنین اندازه گیری روی محور کوره نشان می دهد دما با افزایش شدید در نزدیک دهانه ورودی به مقدار ماکزیمم خود (T_{max}) رسیده و سپس به سمت دهانه خروجی روند نزولی دارد. با توجه به شباهت ابعادی کوره فوق با مطالعات مقیمان [۸]، نتایج توزیع محوری دما با نتایج ایشان مقایسه گردید که از نظر رفتاری تطابق بسیار خوبی نشان میدهد. همچنین ماکزیمم دما حدود ۴٪ اختلاف نشان می دهد.



شکل ۲- توزیع دما داخل کوره A برای سه دبی مختلف

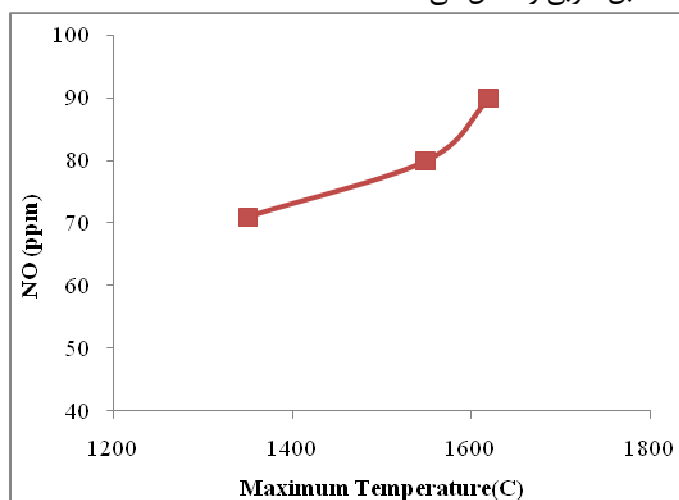
$$Q_1=3.17, Q_2=3.5, Q_3=3.7 \text{ liter/min}$$



شکل ۳- توزیع دما داخل کوره B برای سه دبی مختلف

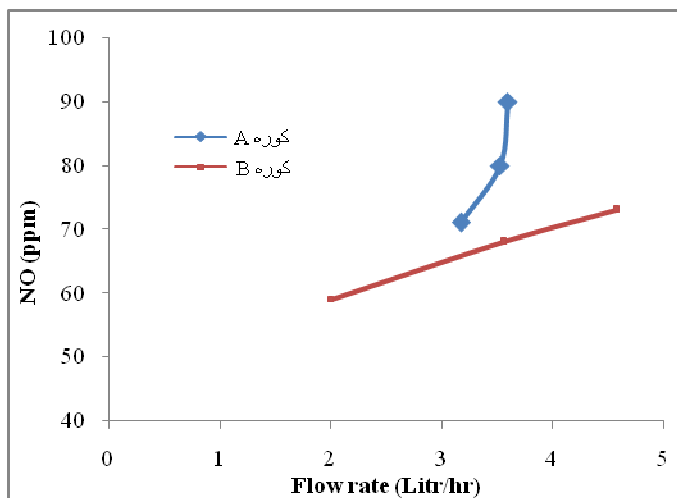
$$Q_1=2.5, Q_2=3.5, Q_3=4.1 \text{ liter/min}$$

در شکل ۴ اثر ماکزیمم دمای شعله بر میزان غلظت اکسیدهای نیتروژن خروجی از کوره نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند که ماکزیمم دمای شعله اثر قابل توجهی بر انتشار NO دارد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش دما میزان انتشار NO افزایش یافته، این روند در دماهای کمتر از 1600 k تقریباً خطی است ولی با بیشتر شدن دما، نرخ افزایش NO شدیدتر می شود که با در نظر گرفتن مکانیزم زلدویچ تغییرات شدید در این ناحیه کاملاً توجیه پذیر است. نتایج حاصل با مطالعات زگو و همکارانش [۹] تطابق خوبی را نشان می دهد.



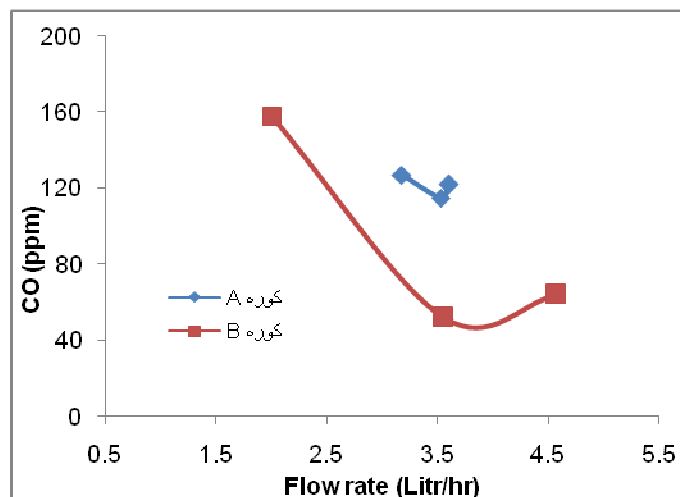
شکل ۴- بررسی وابستگی دمای ماکزیمم کوره و آلاینده NO در کوره A

در شکل ۵ اثر دبی سوخت بر میزان منواکسید نیتروژن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که با افزایش نرخ سوخت ورودی غلظت NO نیز افزایش یافته است که این موضوع به دلیل بالاتر بودن میدان دمایی گازهای احتراق در نرخهای سوخت بالاتر است (مطابق شکل ۳). همچنین نتایج نشان می دهند که غلظت NO در کوره A بیشتر از کوره B می باشد که این نیز به دلیل بالاتر بودن دمای شعله در کوره A نسبت به B می باشد.



شکل ۵- تغییرات NO در خروجی از کوره برای دبی های مختلف سوخت در دو کوره A و B

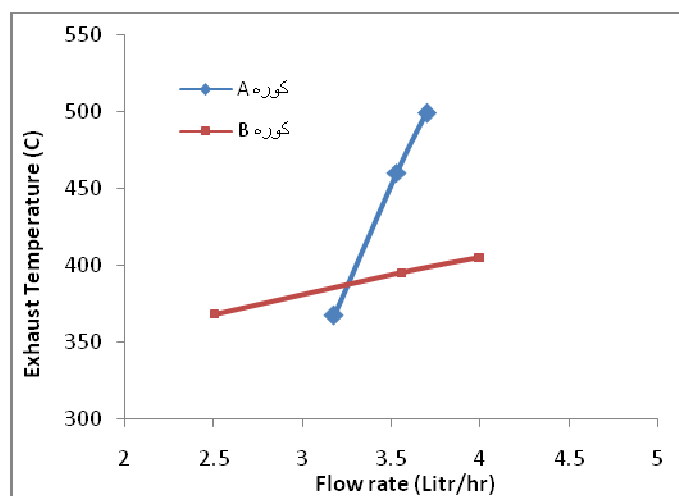
شکل ۶ چگونگی انتشار آلاینده CO را در کوره ها را نشان می دهد. ملاحظه می شود که در هر دو کوره میزان انتشار CO با افزایش دبی ابتدا سیر نزولی داشته و سپس در دبی ماکزیمم دوباره روند صعودی گرفته است. انتشار CO به مقدار هوای اضافه، دمای محصولات احتراق و میزان اختلاط سوخت و هوا بستگی دارد.



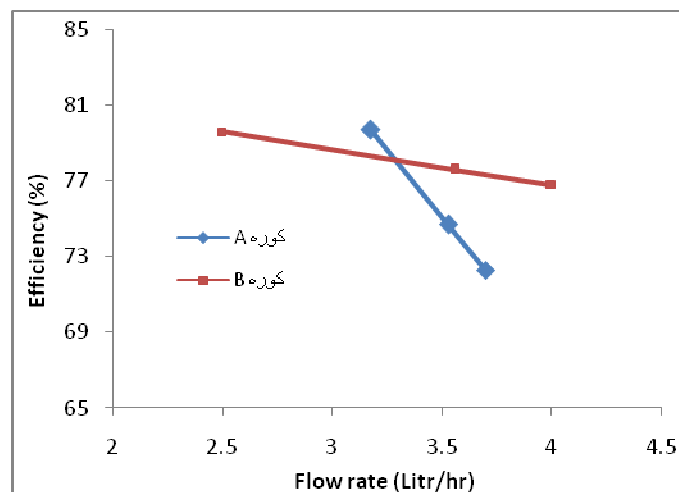
شکل ۶- تغییرات CO در خروجی کوره برای دبی های مختلف سوخت در دو کوره A و B

در شکل ۷ دمای خروجی دو کوره A و B بر حسب دبی سوخت مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد در هر دو کوره روند تغییرات دما با دبی بصورت خطی بوده، اما شیب تغییرات برای کوره A (کوره کوچکتر) بیشتر از کوره B می باشد. می توان گفت که چون در کوره A فضای کافی برای احتراق کامل و انجام واکنشهای مربوطه در دبی های بیشتر از ۳/۳ لیتر در ساعت وجود ندارد تعدادی از این واکنشها در فواصل دورتر از مشعل (نزدیک به محل خروجی کوره) بوقوع می پیوندد که این خود باعث بالاتر رفتن شدید دمای محصولات احتراق در خروج از کوره B می باشد. همانطور که ملاحظه می گردد دمای

محصولات احتراق خروجی در دبی کمتر از ۳/۳ لیتر در ساعت در کوره A بطور ملموسی از کوره B کمتر است. با توجه به اهمیت دمای محصولات احتراق خروجی بر راندمان کوره و وابستگی شدید آن به دبی سوخت (شکل ۷)، در شکل ۸ اثر دبی سوخت مشعل بر راندمان احتراق کوره ها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش دبی سوخت، راندمان احتراق در هر دو کوره کاهش می یابد. همچنین نرخ کاهش راندمان برای کوره کوچکتر بیشتر از کوره B است. همانطور که گفته شد در دبی های کمتر از ۳/۳ لیتر در ساعت کوره A که کوچکتر است عملکرد بهتری داشته و راندمان بالاتری نسبت به کوره B داشته است. اما در دبی های بیشتر از ۳/۳ لیتر در ساعت همانطور که دیده می شود عملکرد کوره B نسبت به کوره A بسیار بهتر است. اندازه گیری مقدار هیدروکربنهای نسوخته (C_xH_y) در خروجی از کوره (توسط دستگاه آنالیزور) نشان می دهد که عدم وجود فضای کافی برای انجام واکنشها در کوره A، سبب کاهش راندمان احتراق این کوره نسبت به کوره B شده است.



شکل ۷- مقایسه دمای خروجی کوره برای سه دبی مختلف کوره ها در دو کوره A و B



شکل ۸- مقایسه راندمان احتراق برای سه دبی مختلف در دو کوره A و B

۵- نتیجه گیری کلی



همانطور که نتایج ارائه شده نشان می دهند ابعاد کوره بر توزیع دمای داخل کوره و انتشار آلاینده ها بسیار موثر می باشند. بر اساس نتایج این تحقیق می توان گفت:

- در یک ظرفیت ثابت مشعل با کاهش ابعاد کوره، بدلیل افزایش دمای کوره میزان انتشار آلاینده های CO و NO_x افزایش چشمگیری می یابند.
- میزان انتشار آلاینده CO در هر کوره وابستگی زیادی به دبی سوخت داشته بطوریکه در آزمایشهای انجام شده، هر دو کوره A و B در دبی ۳/۵ لیتر بر ساعت حداقل انتشار CO را دارند. همچنین کوره A بدلیل ابعاد کوچکتر و دمای بالاتر آن، میزان انتشار CO بیشتری داشته است.
- روند نزولی راندمان احتراق با افزایش دبی، برای کوره کوچکتر بسیار شدید تر می باشد پس به راحتی می توان گفت انتخاب مشعل بزرگتر از ظرفیت کوره اشتباه است .

۵- مراجع

- 1- Licht, W., " *Air pollution control engineering : basic calculations for particulate collection*", 2th edition, Marcell Dikkers, 1988.
- ۲- غیاث الدین، م. آلودگی هوا منابع و اثرات کنترل، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۵
- 3- Roslyakov, P.V., and Zakirov, I.A., "Nonstoichiometric Burning of Natural Gas and Boiler Oil on Power Plants", MEI, Moscow, 2001.
- 4- Wanatabe, H., Suwa, Y., Matsushita, Y., and Morozomi, Y. , "Numerical investigation of spray combustion in jet mixing type combustor for low NO_x emission ",Energy conversion and management, Vol. 49, pp. 1530-1537, 2008.
- 5-H. Wanatabe , Y. Suwa, Y. Matsushita, Y. Morozom, "spray combustion simulation including soot and NO formation ",Energy conversion and management, Vol. 48, pp 2077-2089, 2007.
- 6-J.Li,s.k,Chou,W.M.Yang,z.w.li, "A numerical study on premixed micro -combustion of CH₄-air mixture: effect of combustion size ,geometry and boundary conditions on flame temperature", Chemical engineering journal, Vol. 150, pp. 213-222, 2009.
- 7-M. Moghiman, "Production and emission of pollutants in liquid fuel fired tunnel furnace", Journal of engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Vol. 13, pp. 71-84, 2002.
- 8-M. Moghiman, K. Bashinezhad, I. Zahmatkesh, "An investigation of soot formation and combustion in turbulent spray flames", Kuwait journal of science and engineering, pp 183-202, Vol.34, NO.1, 2007.
- 9- G.G. Szegő, B.B. Dally, G.J. Nathan, *Scaling of NO_x emissions from a laboratory-scale mild combustion furnace*, Combustion and Flame, Vol. 154, pp. 281-295, 2008.