انجمن احتراق ایران

دومین کنفرانس احتراق ایران
بهمن ماه 1386 - مشهد- دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

کد مقاله: CCI2157

بهینه سازی بخاری‌های گاز سوز

مهدی بیدآبادی[1]، محمد صدیقی[2]، سیاوش یوسفی[3]

تهران- میدان رسالت- دانشگاه علم و صنعت- آزمایشگاه سوخت و احتراق
bidabadi@iust.ac.ir

چکیده

با توجه به اهمیت بهینه سازی در مصرف سوخت در این مقاله سعی شده روشهایی برای احتراق بهتر همراه با تولید آلاینده‌های کمتر و بازدهی بهتر بخاری‌های گازسوز دودکش‌دار ارائه گردد. در یک بخاری گازسوز دودکش‌دار میزان هوایی که وارد بخاری می‌شود و نیز اینکه چه مقدار از این هوا به صورت هوای اولیه وچه مقدار به صورت هوای ثانویه وارد می شود بر بازدهی بخاری و میزان آلاینده‌ها بسیار موثر است. در این مقاله ابتدا سعی شده که میزان هوای اضافه مناسب برای عملکرد بهینه یک بخاری به دست آید و پس از آن درصد هوای اولیه وثانویه این میزان هوا برای کمترین آلودگی و بیشترین بازدهی محاسبه شود. در این مقاله اثر تغییر هوای اضافه از 50٪ تا 400٪ و هوای اولیه از 25٪ تا 65٪ مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌ها بیانگر این است که هوای اضافه در محدوده 70٪ تا 120٪ و هوای اولیه 45٪ تا 55٪ بهترین نتایج را بدست میدهد.

واژه های کلیدی: بهینه‌سازی بخاری - بازده بخاری- آلاینده‌ها - تحلیل عددی

1- مقدمه

ایران دارای منابع غنی گاز می‌باشد، به همین دلیل از این ماده مصارف زیادی به عمل می آید که یکی از موارد مهم آن دربخاری‌های گاز سوز است. این وسایل سهم عمده ای در مصرف گاز کشور دارند و بنابراین افزایش بازدهی این وسایل می تواند تاثیر زیادی بر کاهش میزان مصرف گاز کشور داشته باشد. به طور کلی مهمترین عوامل در بازدهی یک بخاری گاز سوز برنر بخاری و کوره آن است. برنر بخاری میزان هوای اولیه کشیده شده توسط بخاری و همچنین میزان اختلاط سوخت و هوا را کنترل می‌کند. هر چه اختلاط سوخت و هوا بیشتر باشد مخلوط یکنواختر خواهد بود. طراحی کوره بخاری میزان انتقال حرارت به محیط و همچنین میزان ورود هوای ثانویه را کنترل می‌کند که تاثیر اساسی بر بازدهی بخاری و آلاینده ها دارد. به طور معمول در یک بخاری ٪35 تا ٪50 هوای استکیومتری لازم برای احتراق از طریق هوای اولیه که برنر می‌کشد تامین می‌شود[1]. برای اینکه سوخت به طور کامل بسوزد و همه سوخت به اکسیدایزر دست یابد باید مقداری هوای اضافه وارد بخاری شود. معمولا کوره ها طوری طراحی می‌شوند که ٪50 تا ٪300 هوای اضافه وارد بخاری می‌شود. این میزان هوا از طرق هوای ثانویه تامین می‌شود. مقدار هوای اضافه به کم یا زیاد بودن شعله بخاری بستگی دارد، معمولا هر چه شعله بخاری بیشتر باشد درصد هوای اضافه کمتر خواهد بود، زیرا سوخت بیشتری وارد بخاری شده و مقدار بیشتری از هوای ثانویه مصرف می‌شود.

1- استادیار- مهندسی مکانیک
2- استادیار- مهندسی هوا فضا
3- دانشجو - دانشکده مکانیک

Archive of SID

www.SID.ir

2- احتراق گاز متان

معادله واکنش استکیومتری گاز متان با هوا به صورت زیر میباشد:

$$CH_4 + 2\,(O_2 + 3.76\,N_2) \Longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O + 7.52\,N_2 \qquad (1)$$

با توجه به اینکه در بخاری هوای اضافه نیز وجود دارد و با فرض اینکه میزان هوایی که به سوخت داده می‌شود برابر X باشد معادله به صورت زیر در می آید:

$$CH_4 + X(O_2 + 3.76\,N_2) \Longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O + (X-2)\,O_2 + (3.76\,X)\,N_2 \qquad (2)$$

مقدار هوای اضافه که به صورت درصدی از هوای استکیومتر بیان میشود برابر مول O_2 در سمت راست تقسیم بر 2 است. بنابر این هوا اضافه برابر (X-2)/ 2 است. برای یک احتراق کامل لازم است که هوابه میزان کافی موجود باشد. همچنین دما در ناحیه کافی بالا باشد تا شرایط لازم برای واکنش و زمان کافی برای واکنش تمام سوخت مهیا شود.

3-آلاینده ها

از آنجا که در یک بخاری ایجاد همه شرایط لازم برای واکنش کامل میسر نمی باشد همیشه مقداری آلاینده در محصولات وجود دارد. این آلاینده‌ها شامل CO , NO_x و SO_x می‌شوند. در حال حاضر برنرها طوری طراحی می‌شوند که SO_x بسیار کمی تولید می‌شود[2]. تولید CO معمولا به دلیل کمبود اکسیژن یا دمای پایین شعله است[2] افزایش هوای اولیه و هوای اضافه تاثیر اساسی بر کاهش CO دارند.[2] با این وجود حتی در مقادیر زیاد هوای اضافه نیز مقدار ناچیزی CO در محصولات دیده می‌شود. NO و NO_2 در اثر واکنش نیتروژن وارده از هوای اولیه وثانویه تولید می‌شوند. معمولا هوای اولیه خیلی کم یا دمای زیاد شعله باعث ایجاد NO_x می شود. زیرا برای واکنش نیتروژن دمای بالا لازم است[2].

4- بازده بخاری

برای محاسبه بازده بخاری به روش تجربی از امکانات آزمایشگاه وسایل گازسوز اداره استاندارد و تحقیقات صنعتی کشور و آنالایزر 350x تستو آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشگاه علم و صنعت استفاده کرده‌ایم.با توجه به فرمول محاسبه بازده بخاری، بازده بخاری به دمای خروجی محصولات از دودکش، درصد CO_2 خروجی و میزان CO بستگی دارد. در یک دبی سوخت ثابت هر چه دمای محصولات خروجی کمتر، میزان CO_2 در خروجی بیشتر و میزان CO کمتر باشد بازده بخاری بیشتر است. تاثیر CO کمتر از دو مورد دیگر است. کاهش دمای محصولات خروجی باعث افزایش بازدهی می گردد، اما باعث کاهش نیروی بالا برنده گاز در دودکش هم می شود که خطر احتمالی برگشت محصولات احتراق به داخل اتاق را در پی دارد.[3] همچنین محصولات احتراق نباید قبل از خروج از دودکش به دمای نقطه شبنم برسند چون باعث تولید اسیدهای خورنده خواهند شد، بنابراین دمای محصولات خروجی باید از حد معینی پایین‌تر آورده نشود. [3] بالا بردن درصد CO_2 در محصولات به معنی احتراق با هوای اضافه کمتر است، زیرا درصد CO_2 برابر است با :

$$CH_4 + X\,(O_2 + 3.76\,N_2) \Longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O + (X-2)\,O_2 + (3.76X)\,N_2 \qquad (3)$$

$$\text{درصد مولی } CO_2 = 1/(1 + 2 + X - 2 + 3.76\,X) = 1/(1 + 4.76\,X) \qquad (4)$$

با کاهش هوای اضافه دمای محصولات احتراق بالاتر میرود، بنابراین دمای بدنه کوره هم بالاتر می‌رود که در نتیجه در یک سطح معین انتقال حرارت بیشتری هم از جهت همرفت و هم از جهت تشعشع به محیط صورت می گیرد وبنابراین بازده بخاری بالاتر می‌رود. افزایش بازده بخاری تا زمانی که هوای اضافه تقریباً به صفر برسد(هوای استکیومتری) ادامه دارد. در حقیقت تمام محصولات احتراق و هوای اضافه‌ای که گرم می‌شود پس از انتقال حرارت به کوره به بیرون از محیط انتقال می‌یابند، چون دمای این محصولات

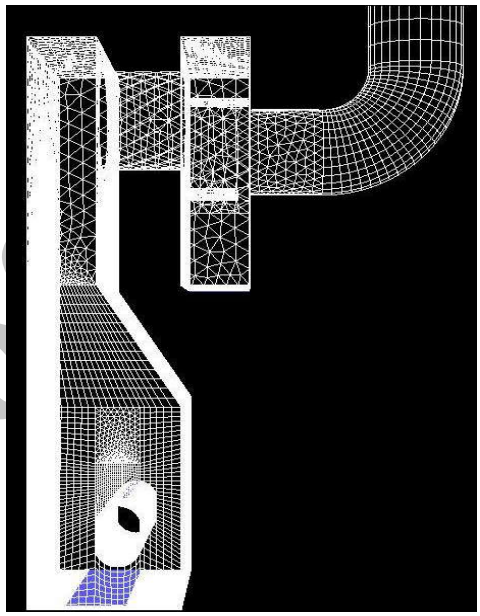
Archive of SID

www.SID.ir

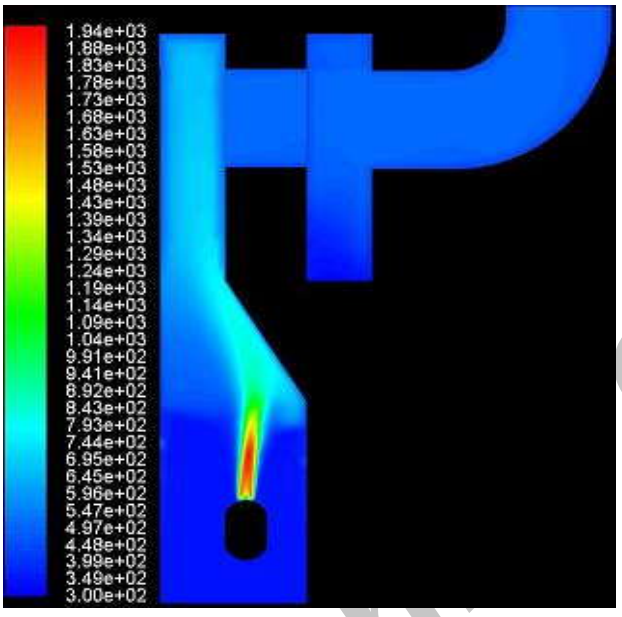
و هوای گرم از دمای محیط بیشتر است حاوی انرژی هستند که این انرژی با خروج محصولات از دودکش تلف می‌شود، بنابراین با کاهش هوای اضافه مقدار انرژی که تلف می‌شود کمتر خواهد بود ولی کاهش هوای اضافه به معنی افزایش آلاینده‌هاست. بنابراین هوای اضافه باید به میزانی باشد که آلاینده ها در سطح قابل قبول باقی بمانند و در عین حال بازدهی بخاری مناسب باشد.

5- مدل سازی

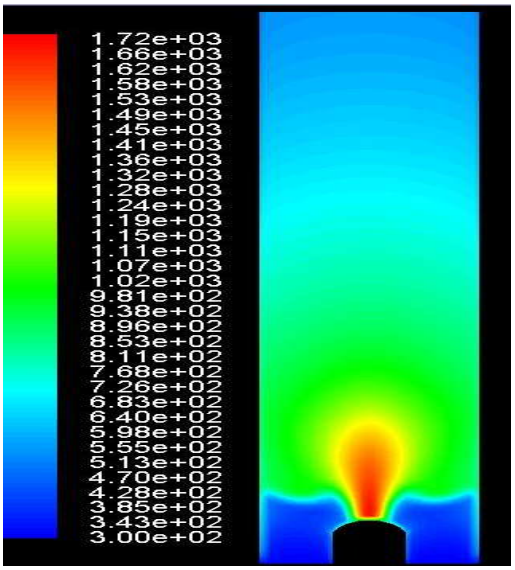
برای مدل‌سازی در این تحقیق از نرم افزار FLUENT استفاده شده است. در مدل سازی درصد هوای اولیه و میزان هوای ثانویه وهوای کل به صورت جدا تغییر داده شده و تاثیر هر یک بر بازده بخاری و میزان آلاینده ها بررسی شده است.



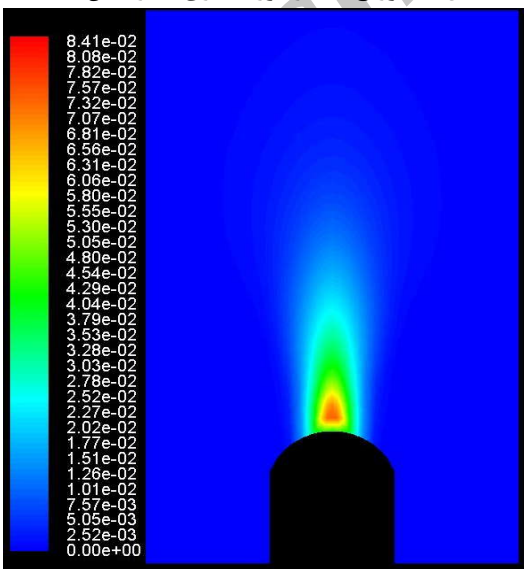
شکل 1- کوره کامل بخاری انتخابی



شکل 2- توزیع دما در کوره بخاری تا دودکش



شکل 3 - توزیع دما در کوره T(K)

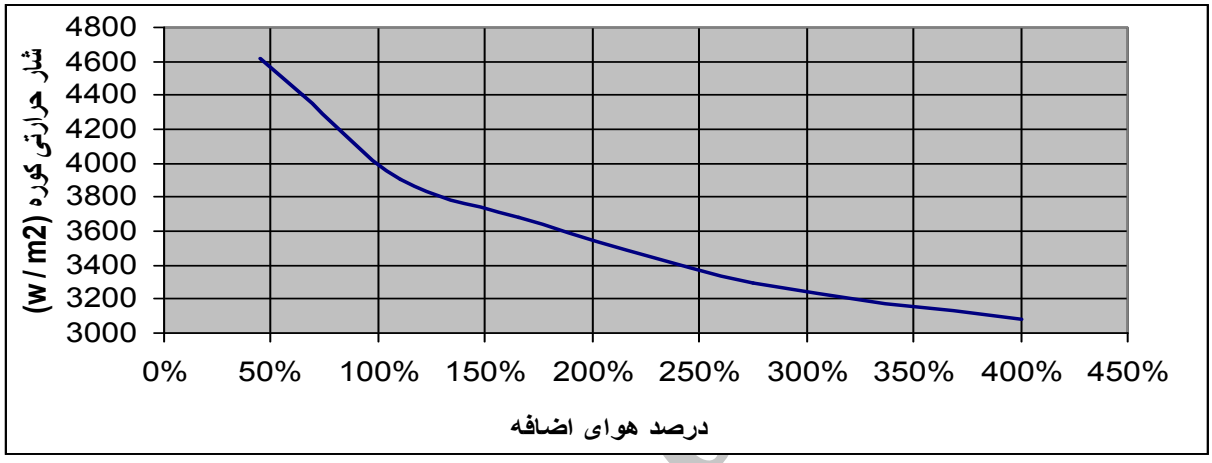


شکل 4 - توزیع درصد جرمی CO در کوره

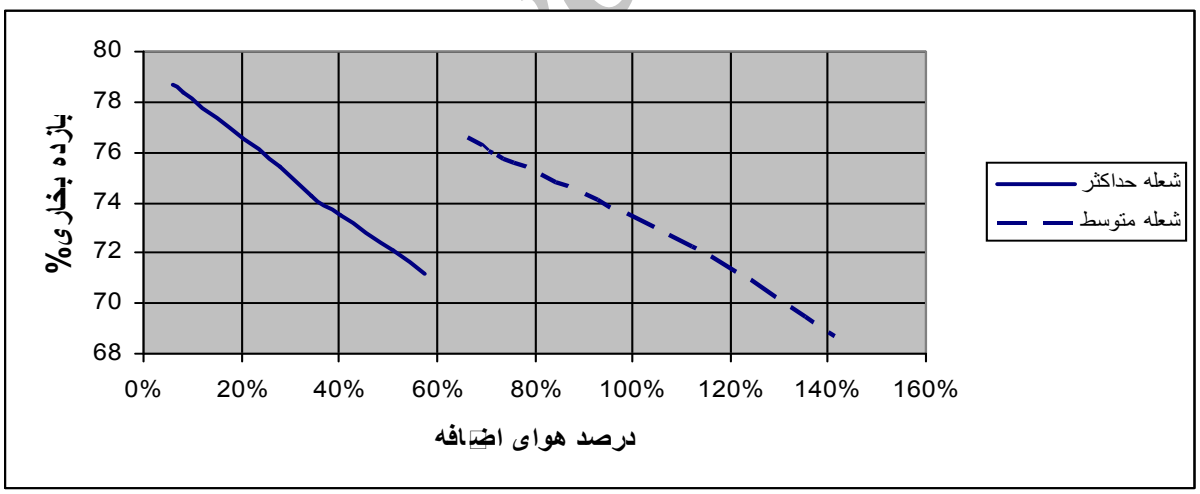
www.SID.ir

5-1- تاثیر هوای اضافه بر بازده بخاری

در مدل اول دبی سوخت، سرعت خروجی از برنر و درصد هوای اولیه ثابت نگه داشته شده و میزان هوای ثانویه تغییر پیدا کرده تا تاثیر آن بر بازده بخاری و آلاینده‌ها دیده شود.در نمودار 1 تاثیر هوای اضافه بر شار حرارتی از بخاری که به کمک نرم افزار FLUENT مدل شده است دیده می‌شود و در نمودار 2 نتایجی که از آزمایش با دستگاه تستو 350x به دست آمده نشان داده شده است.



نمودار 1 – تاثیر هوای اضافه بر انتقال حرارت (بازده) بخاری به کمک نرم افزار



نمودار 2 – تاثیر هوای اضافه بر بازده بخاری به صورت تجربی

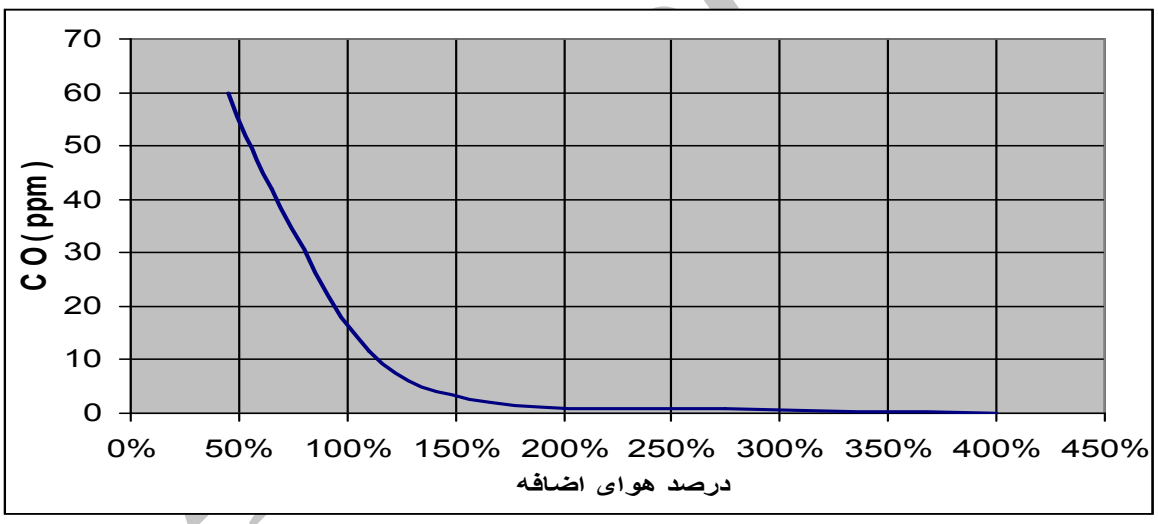
از آنجا که محاسبه بازده بخاری به صورت مستقیم از نتایج عددی امکان پذیر نیست از شار حرارتی کوره که معادل بازده بخاری است استفاده شده است. در توضیح فیزیک مسئله باید گفت همانگونه که در نمودار (1) و (2) دیده می‌شود با کاهش هوای اضافه میزان انتقال حرارت یا بازده بخاری افزوده شده که کاملاً طبق انتظار است، زیرا کاهش هوای اضافه به معنی افزایش درجه حرارت محصولات احتراق است، چون انرژی آزاد شده از واکنش سوخت صرف گرم کردن تعداد کمتری مول هوا می شود، بنابراین دمای

www.SID.ir

محصولات احتراق بالاتر می‌رود[3]. افزایش دمای محصولات به معنی افزایش دمای بدنه کوره ودر نتیجه افزایش اختلاف دما بین کوره و هوای محیط است که سبب انتقال حرارت بیشتر هم از طریق هدایت و هم از طریق تشعشع به محیط می شود. با توجه به اینکه دبی سوخت در این مدل ثابت است، هرچه شار حرارتی از کوره بیشتر باشد حرارت داده شده به محیط بیشتر و بنابراین بازده بخاری بیشتر است. در آزمایش تجربی ابتدا بخاری به صورت نرمال تست شده و بازده آن اندازه گیری شده است، سپس برای کاهش هوای اضافه مقداری از ورودی هوای ثانویه بسته شده تا هوای کمتری وارد بخاری شود و از این طزیق درصد هوای اضافه کاهش داده شده است. آزمایشات تجربی برای چند دبی مختلف گاز ،از شعله حداکثر تا حداقل انجام شده است است که در بالا 2 نمودار برای شعله حداکثر و شعله متوسط بخاری نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است نتایج عددی و تجربی هماهنگی مناسبی دارند.

5-2- تاثیر هوای اضافه بر آلاینده ها

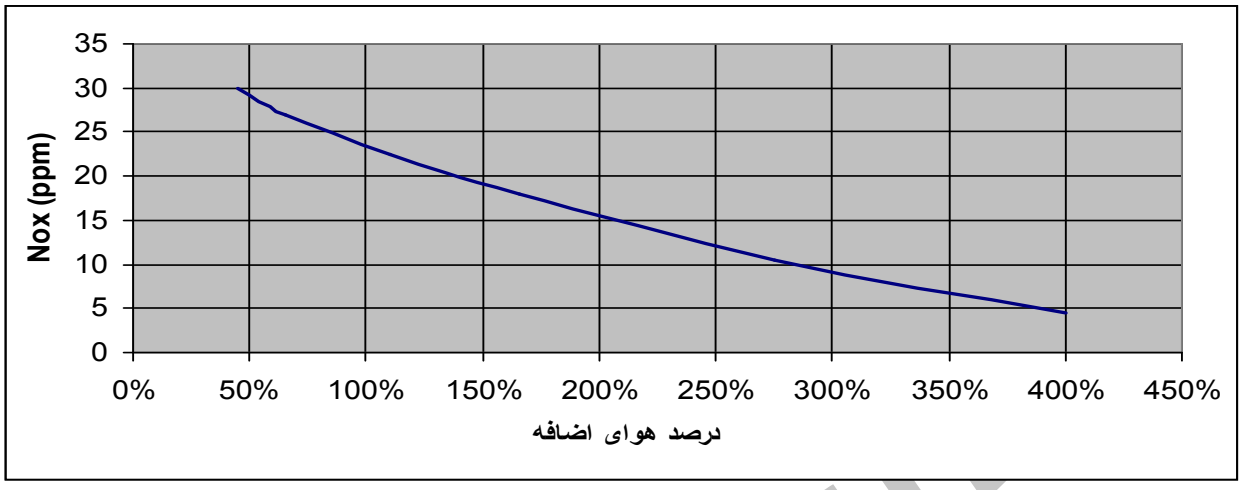
همانگونه که در نمودار (3) دیده می شود کاهش هوای اضافه تاثیر زیادی بر تولید CO دارد. به گونه‌ای که این تاثیر حالت تصاعدی داشته و در مقادیر هوای اضافه کم میزان CO به شدت افزایش می یابد. توضیح فیزیک مسئله بدین گونه است که با افزایش هوای اضافه امکان رسیدن هوا به سوخت افزایش می یابد و به همین جهت امکان تشکیل CO کمتر می‌شود. در واکنش C و O_2 ابتدا C به CO تبدیل شده و در صورت باقی ماندن O_2 اضافه CO به CO_2 تبدیل می‌شود.بنابراین با افزایش هوای اضافه تعداد بیشتری از CO ها می‌توانند به CO_2 تبدیل شوند.[4]



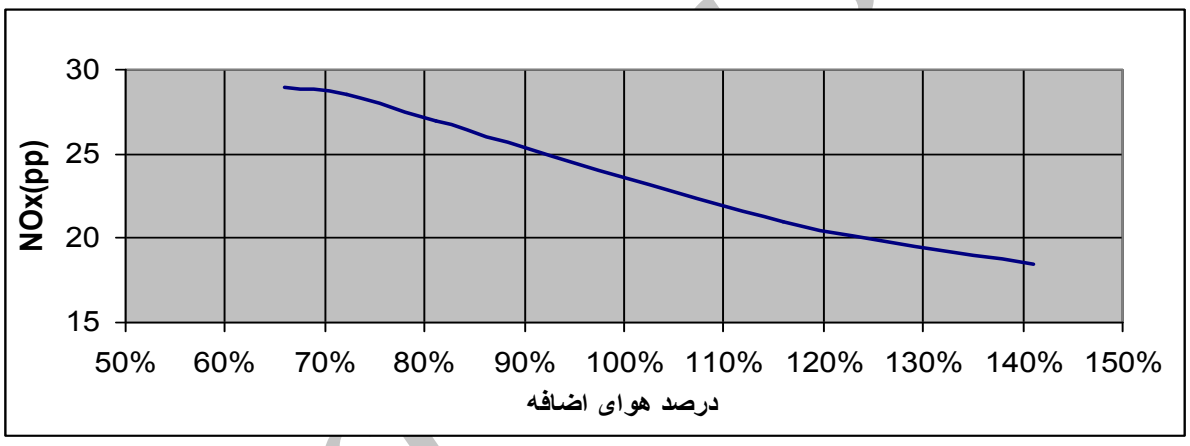
نمودار 3- تاثیر هوای اضافه بر آلاینده CO به کمک نرم افزار

علاوه بر آن با افزایش هوای اولیه تعداد بیشتری مول هوا موجود خواهد بود که نسبت مول CO به مول کل را کاهش می‌دهد، یعنی حتی اگرفرض کنیم تولید CO ثابت است با 2 برابر کردن هوای اضافه تقریبا درصد CO در محصولات نصف می شود. البته کاملاً واضح است که با 2 برابر کردن هوای اضافه مقدار CO به شدت کاهش می یابد،مخصوصا در هوای اضافه کمتر از 100٪.مثلا در هوای اضافه 50٪ میزان CO برابر 55 ppm و در هوای اضافه 100٪ برابر 17 ppm است.

www.SID.ir



نمودار 4 - تاثیر هوای اضافه بر آلاینده NOx در نرم افزار



نمودار 5 - تاثیر هوای اضافه بر آلاینده NOx به صورت تجربی

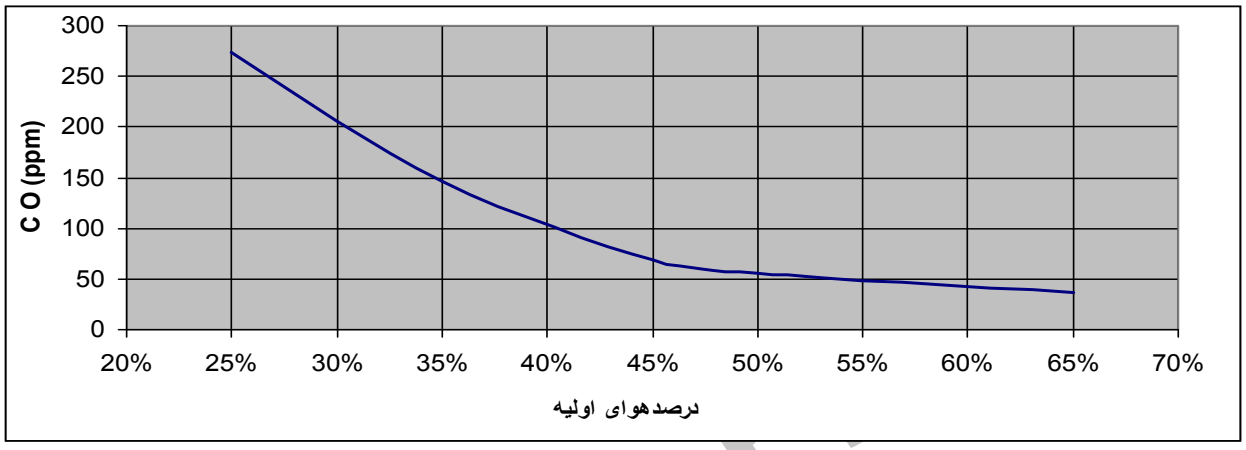
با توجه به نمودار (4) و (5) تاثیر هوای اضافه بر NO_x به صورت تقریبا خطی است. بدین معنی که تولید NO_x وابستگی اندکی به هوای اضافه دارد و فقط در اثر افزایش مول های هوای اضافه درصد مولی NO_x کمتر شده است، ولی دبی تولید NO_x تقریبا ثابت است. بدین دلیل که تولید NO_x همان گونه که در مدل بعد خواهیم دید بیشتر به میزان هوای اولیه و دمای ماکزیمم شعله بستگی دارد، زیرابیشتر NO_x در لایه نازک شعله که دمای زیادی دارد تشکیل می شود[5] و دمای این قسمت به هوای اولیه وابستگی شدید دارد، نه به میزان هوای اضافه.

5-3- تاثیر هوای اولیه بر آلاینده ها

با توجه به اینکه تغییر هوای اولیه به صورت تجربی در بخاری مستلزم تغییر در ساختار برنر بخاری است و علاوه بر آن برای بررسی تاثیر هوای اولیه نیاز به استفاده از 2 آنالایزر به صورت همزمان است که این امکان در آزمایشگاه وجود ندارد، تاثیرات هوای اولیه فقط به صورت عددی مدل شده است.

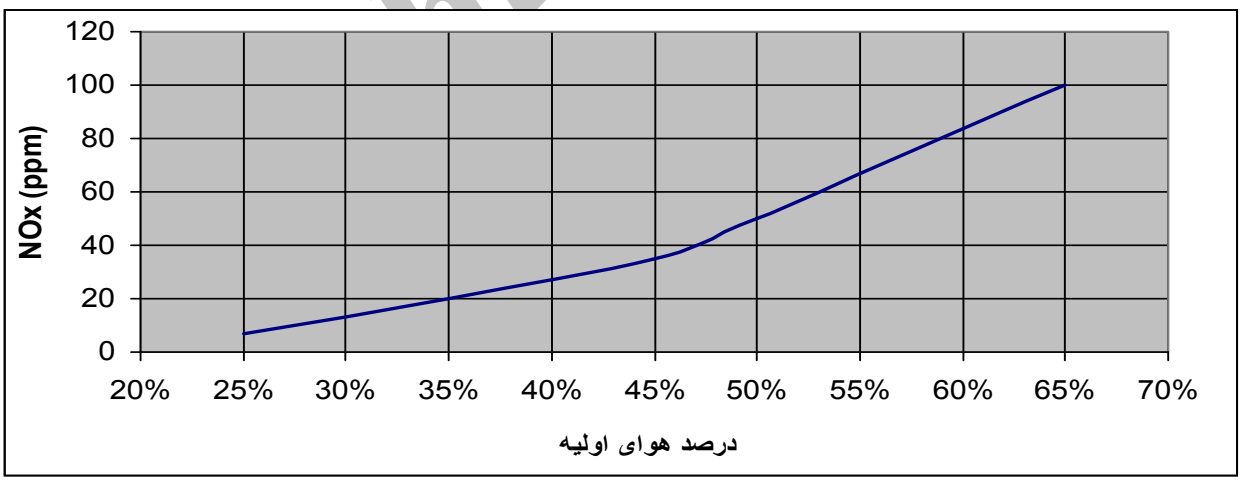
www.SID.ir

در این مدل دبی سوخت و مقدار هوای اضافه ثابت نگه داشته شده، ولی مقدار هوای اولیه و ثانویه تغییر پیدا کرده است، به صورتی که(دبی هوای اولیه + دبی هوای ثانویه = ثابت). هدف از این کار بررسی تاثیر ترکیب هوای اولیه و ثانویه بر بازدهی وآلاینده ها می‌باشد. با افزایش هوای اولیه مقدار هوای ثانویه به گونه‌ای کاهش داده شده که دبی کل هوا ثابت باشد، یعنی مقدار هوای اضافه در همه موارد برابر 50٪ است و فقط ترکیب این هوا به صورت اولیه وثانویه تغییر یافته است.



نمودار 6 - تاثیر هوای اولیه بر آلاینده CO به کمک نرم افزار

طبق نمودار(6) با افزایش هوای اولیه مقدار CO کاهش می یابد، زیرا سوخت بیشتری قادر به دستیابی بموقع به اکسیژن است. هرچه هوای اولیه کمتر باشد، مقدار بیشتری هوای ثانویه باید به درون سوخت نفوذ کند تا سوخت به اکسیدایزر دست یابد.[4] البته هوای لازم باید در زمان مناسب به سوخت برسد، یعنی هنگامی که دمای سوخت بالاست و شرایط واکنش وجود دارد، در غیر این صورت سوخت با اکسیژن واکنش نمی‌دهد. ضمناًدر هوای اولیه کمتر از 45٪ سرعت تولید CO افزایش می‌یابد.

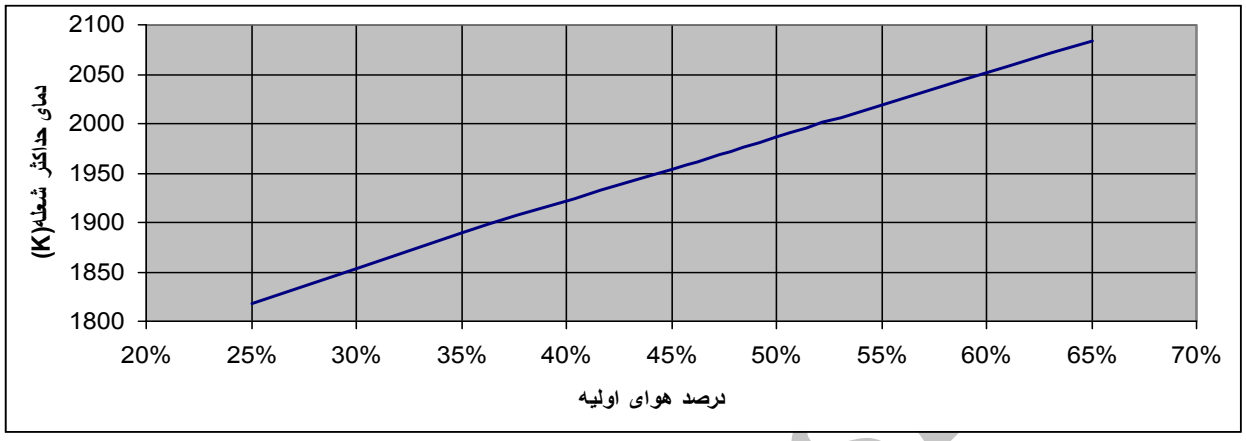


نمودار 7 - تاثیر هوای اولیه بر آلاینده NOx به کمک نرم افزار

در حالی که میزان CO با افزایش هوای اولیه کاهش می یابد، میزان NO_x افزایش می یابد، مطابق نمودار(7). دلیل آن هم در نمودار(8) مشخص می شود. نمودار(8) نشان می‌دهد با افزایش هوای اولیه دمای حداکثر شعله افزوده می شود [6]. افزایش دمای شعله باعث ایجاد شرایط مناسب برای تولید NO_x می گردد.[4] چنانچه هوای اولیه به حدود 100٪ هوای استکیومتر برسد حداکثر

www.SID.ir

دما در شعله ایجاد می شود[6]. و چون تولید NOx با افزایش دمای شعله افزایش می‌یابد بنابرای با افزایش هوای اولیه تا حد هوای استکیومتری میزان NOx نیز افزوده می‌شود.



نمودار 8 - تاثیر هوای اولیه بر دمای حداکثر شعله

6-آزمایشات

آزمایشات انجام شده شامل اندازه‌گیری NO_x ، O_2 ، CO_2 ، CO ودما در دودکش بخاری،درون کوره(قبل از ورود هوا از طریق کلاهک تعدیل)و اندازه‌گیری درصد مولی O_2 درون برنر بوده است.

برای مدل‌سازی یک بخاری علاوه بر مدل‌سازی ساختار برنر و کوره بخاری لازم است میزان سوخت مصرفی بخاری، درصد هوای اولیه و میزان هوای ثانویه ورودی نیز مشخص باشد. برای اطلاع از میزان هوای اولیه که توسط برنر کشیده می‌شود کافی است که آنالایزر را درون برنر(قبل از شروع احتراق) قرار دهیم و بخاری را روشن کرده ودبی را تنظیم کنیم. برای اینکار از آنالایزر 350x تستو آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشگاه علم و صنعت استفاده کرده‌ایم، بدین صورت که در انتهای برنر سوراخی کوچک ایجاد کرده و آنالایزر را درون برنر قرار دادیم، سپس با فاصله زمانی 30 ثانیه بین دو اندازه‌گیری تعداد 6 بار نمونه‌برداری انجام شد که اعداد نزدیک به هم بودند و سپس متوسطی از این مقادیر به عنوان درصد مولی گاز O_2 درون برنر انتخاب شد. برای ارتباط دادن درصد مولی اکسیژن در مخلوط سوخت و هوا و میزان هوای اولیه بدین صورت عمل می‌کنیم:

با توجه به اینکه درون برنر هنوز احتراق صورت نگرفته است اگر آنالایزر را طبق شکل 3 در محل (1) قرار دهیم داریم:

$$(1) ==> CH_4+ X(O_2+3.76\ N_2) \quad \text{بنابراین} \rightarrow \text{درصد مولی } O_2= X/(1+4.76X) \qquad (5)$$

چنانچه آنالایزر (1) درصد مولی O_2 را برابر K_1 نشان دهد آنگاه:

$$X/(1+4.7X)=K_1 ==> X=K_1+4.76(K_1)\ X ==> X(1-4.76\ K_1)=K_1 ==> X=K_1/(1-4.76\ K_1) \qquad (6)$$

بدین صورت میزان هوای اولیه کشیده شده توسط برنر مشخص می شود.

چنانچه درصد مولی O_2 در ناحیه 2 برابر K_2 باشد آنگاه:

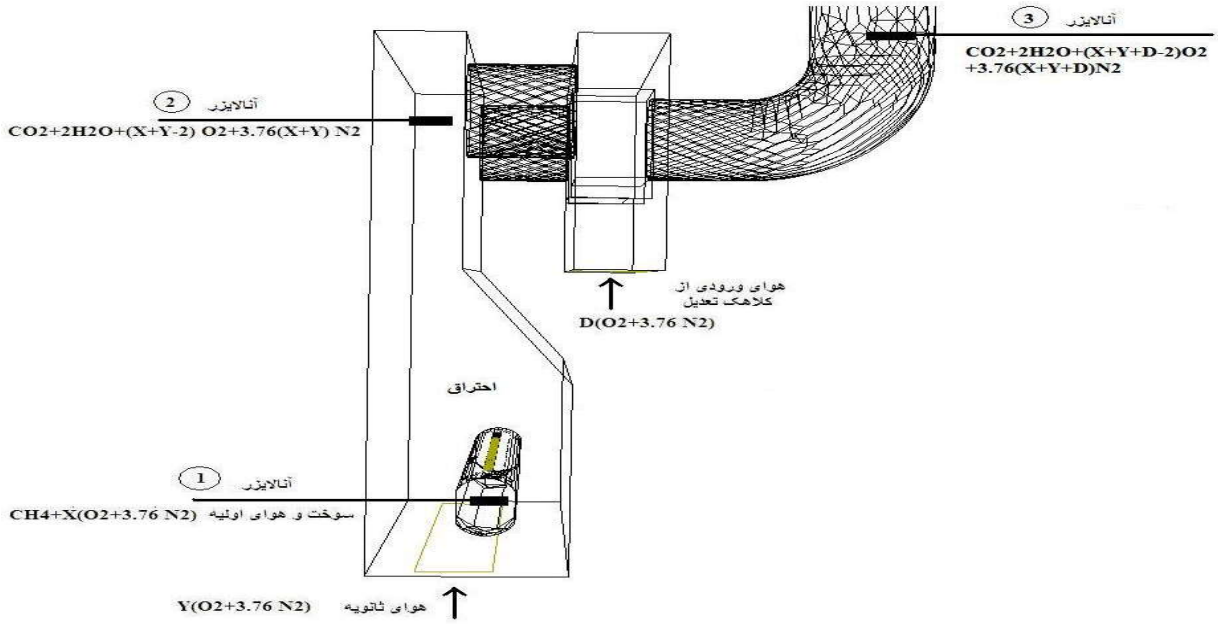
$$2 ==> \text{درصد مولی } O_2=(X+Y-2)/(1+2+X+Y-2+3.76X+3.76Y)=K_2$$

$$==> X+Y=(K_2+2)/(1-4.76\ K_2) \qquad (7)$$

با مشخص بودن X میتوان Y را نیز بدست آورد که نشان می دهد به ازای 1 مول سوخت چند مول هوای اولیه و چند مول هوای ثانویه وارد شده است. مقادیر CO ، NO_x و دما به صورت مستقیم در هر ناحیه اندازه گیری می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل3- نحوه انجام آزمایشات

7-نتایج

با توجه به نمودارها می توان دریافت که هوای اضافه حدود ٪70 تا 120٪ دارای بازدهی مطلوب ودرصد آلاینده های قابل قبول است. همانگونه که از نمودار (3) مشخص است کاهش میزان آلاینده CO در هوای اضافه بالاتر از 120٪ بسیار کم است، همچنین افزایش هوای اضافه تاثیری بر تولید NO_X ندارد، بنابراین به هیچ صورتی هوای اضافه بالاتر از 120٪ قابل توجیه نیست. در بسیاری از بخاری‌ها میزان هوای اضافه در حالتی که بخاری با شعله کم روشن است تا 300٪ هم میرسد، زیرا کوره بخاری بگونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند هوای اضافه برای شعله ماکزیمم را تامین کند. یکی از دلایلی که باعث می‌شود در اندازه‌گیری‌ها همیشه بازده بخاری در حالت شعله کم از بازده بخاری در حالت شعله ماکزیمم کمتر باشد وجود هوای اضافه خیلی زیاد است. میزان هوای اضافه به طراحی کوره ونیز توان حرارتی بخاری نیز بستگی دارد که در این مقاله بررسی نشده است. همچنین میزان هوای اولیه حدود 45٪ تا 50٪ باعث می شودتولید CO و NO_x در حد متعادل باشد. به گونه ای که نه CO افزایش زیادی داشته باشد و نه NO_x مطابق نمودار (6) و (7). چنانچه هوای اولیه کمتر از 45٪ باشد تولید CO به سرعت افزایش می‌یابد. همچنین افزایش هوای اولیه از 50٪ به بالا تاثیر کمی روی کاهش CO دارد، ولی این افزایش هوای اولیه مطابق نمودار (5) باعث افزایش شدید در NO_x می‌شود. به همین دلیل هوای اولیه بین 45٪ تا 50٪ توصیه می‌گردد.

مراجع

1- مهندس موستوفی زاده ، طراحی مشعل های اتمسفریک، انتشارات هومن
2- Weber, E.J and Vandaveer ,Gas Burner Design , Gas engineer's Handbook , The industrial Press , New York , 1965
3- Rhine ,J.M.,Modeling Gas-Fired Furnaces and Boilers and other Industrials Heating, 1996
4- Jones,H.R.N.(Howard Richard Neil),The application of COmbustion principle to domestic gas burner design,1993
5- Lewis,B.and von Elbe,G., Combustion, Flames and Explosion of Gases,1981
6- Edward A.Faulkner , Guid to efficient Burner operation:Gas , Oil and Doul Fuel, 1988

Archive of SID
www.SID.ir