

روش‌های کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن در محفظه احتراق

سمانه کمیلی^{۱*}، عبدالله مصطفایی^۱، مرتضی جلالی لیچایی^۱

۱* - گروه پژوهشی محیط زیست، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: تیر ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: مهر ۱۳۹۷

چکیده

در این مطالعه مروری بر انواع روش‌های کاهش مقدار تولید اکسیدهای نیتروژن در سیستم‌های احتراقی ساکن در حین احتراق انجام شد. مزایا و معایب این روش‌ها و نحوه اثرگذاری آن‌ها تبیین شد. تغییر نوع سوخت، استفاده از هوای اضافی کمتر، بهینه‌سازی احتراق، مرحله‌سازی احتراق، وارد کردن جریان مواد ثانویه به محفظه احتراق به منظور کاهش دمای بیشینه، کاهش مقدار اکسیژن در دسترس، احیاء اکسیدهای نیتروژن به مولکول نیتروژن، تغییر نوع احتراق به واکنشی کاتالیستی جزو انواع راه‌هایی است که میزان اکسیدهای نیتروژن را در خروجی مشعل کم می‌کند. هر سیستم احتراقی با توجه به ویژگی‌های منحصر به خودش قابلیت استفاده از یک یا چند روش را دارد که می‌تواند تا ۷۰٪ میزان اکسیدهای نیتروژن را کاهش دهد البته میزان کاهش اکسیدهای نیتروژن به پارامترهای متعددی از جمله: نوع سوخت، فناوری احتراق، شرایط عملیاتی، ویژگی‌های فرآیندی، امکان نصب تجهیزات جدید، مشخصات گازهای احتراق، حد مجاز آلاینده، اثرات جانبی آلاینده، ایمنی عملیات و قابلیت اطمینان بخشی فرآیند و هزینه‌ها وابسته است.

واژه‌های کلیدی: اکسید نیتروژن، احتراق، مشعل، مرحله سازی، هوای اضافی

مقدمه

حدود ۸۸٪ انرژی دنیا، از احتراق سوخت‌های فسیلی مثل نفت، گاز طبیعی و ذغال سنگ بدست می‌آید (Basfar et al., 2010) در احتراق سوخت‌های فسیلی، به علت دمای بالا، رادیکال‌های نیتروژن و اکسیژن تشکیل می‌شوند که با هم واکنش داده و اکسید نیتروژن تولید می‌شود. اکسیدهای نیتروژن (NO_x) نه تنها آلاینده هوا هستند، بلکه می‌توانند با هوا واکنش داده و ازن تولید کنند، یا با مولکول‌های آب واکنش دهند و باران‌های اسیدی تولید شود، پس می‌توانند منبعی برای ایجاد آلاینده‌های ثانویه هم

باشند. این آلاینده بر روی سلامت انسان‌ها و دیگر جانداران، اسیدی شدن خاک و آب، تغییرات اقلیم، خرابی سازه‌های باستانی، کاهش دید، تنوع گونه‌های زیستی، خوردگی تجهیزات و ... اثر مخرب دارد (Biroli et al., 2016). NO_x نماینده هفت نوع ترکیب اکسید نیتروژن است که در جدول ۱ معرفی شده‌اند (Cox et al., 1999). والانس اکسیژن معمولاً ۲- است، پس تعداد اکسیژن در مولکول NO_x بستگی به حالت والانس اتم نیتروژن دارد تا آن را خنثی کند. معمولاً در سیستم‌های احتراقی NO ، N_2O و NO_2 تولید می‌شوند.

جدول ۱- انواع اکسیدهای نیتروژن (Cox et al., 1999)

فرمول	نام	والانس نیتروژن	خواص
N_2O	اکسید نیتروژن	۱	گاز بی‌رنگ و قابل حل در آب
NO N_2O_2	نیتریک اکسید دی اکسید دی نیتروژن	۲	گاز بی‌رنگ و اندکی قابل حل در آب
N_2O_3	تری اکسید دی نیتروژن	۳	جامد سیاه، قابل حل و تجزیه در آب
NO_2 N_2O_4	دی اکسید نیتروژن تترا اکسید دی نیتروژن	۴	گاز قهوه‌ای-قرمز، بسیار قابل حل و تجزیه در آب
N_2O_5	پنتا اکسید دی نیتروژن	۵	جامد سفید، بسیار قابل حل و تجزیه در آب

مواد و روش‌ها

این مقاله مروری است و اطلاعات این مقاله از منابع معتبر بین‌المللی، گزارش‌های فنی مربوط به سازمان‌های بین‌المللی پیش‌تاز در زمینه کاهش آلاینده‌ها و کتاب‌های مرجع در این زمینه استخراج، تحلیل و جمع‌بندی شده است. بعد از جمع‌آوری منابع، آن‌ها دسته‌بندی شدند و تمام روش‌های مورد نظر در مورد کاهش اکسیدهای نیتروژن در محفظه احتراق بررسی، تحلیل و ارائه شد.

نتایج

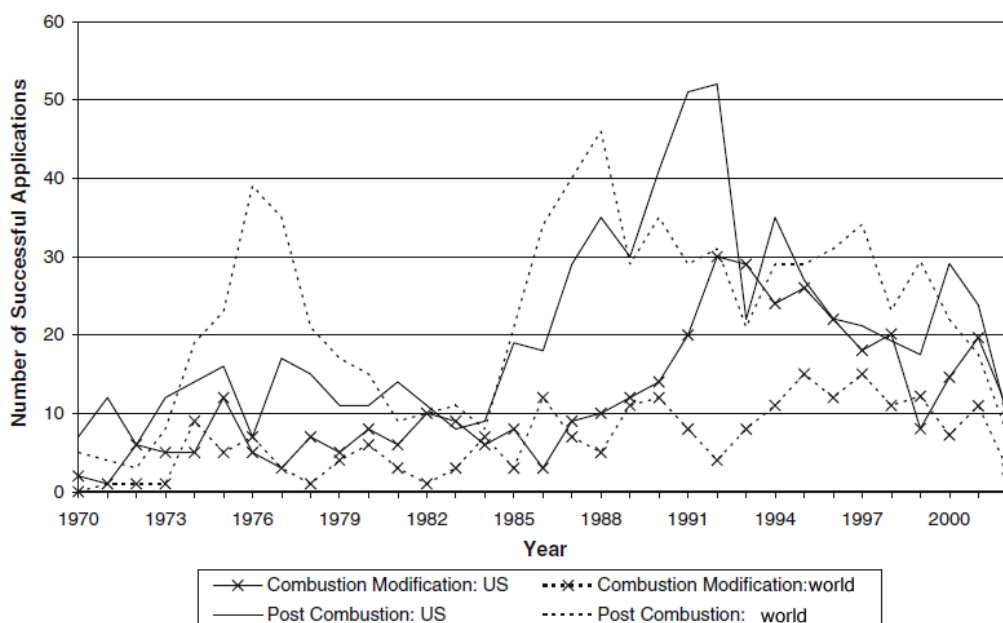
روش‌های کاهش میزان اکسیدهای نیتروژن

کاهش تولید NO_x حول هفت محور اصلی انجام می‌شود که عبارتند از: حذف مولکول نیتروژن در احتراق، کاهش

در هر احتراقی سه منبع تولید NO_x وجود دارد؛ NO_x حرارتی که میزان انتشار آن با دمای بیشینه احتراق و غلظت اکسیژن کنترل می‌شود. نوع دیگر NO_x سوختی است که در سوخت‌هایی که نیتروژن دارند، تولید می‌شود و آخرین نوع، NO_x سریع^۱ است که از ترکیب دو مولکول نیتروژن هوا با سوخت در زمانی که ترکیب احتراق غنی از سوخت است تشکیل می‌شود به طوری که رادیکال‌های هیدروکربنی حاوی نیتروژن تولید می‌شوند، این رادیکال‌ها واکنش می‌دهند و اکسید نیتروژن تولید می‌شود و تا حدودی در همه احتراق‌ها شکل می‌گیرد. در مورد فراوانی این نوع NO_x منازعاتی وجود دارد. این نوع اکسید نیتروژن در زمان خیلی کوتاهی در داخل شعله ایجاد می‌شود (Cox et al., 1999, Richards, 2000).

توجه به استفاده از فناوری‌های بهبود احتراق و روش‌های کنترل انتشار را نشان می‌دهد (Popp, 2010). در اوایل اجباری شدن قوانین زیست‌محیطی و برنامه جهانی کاهش گازهای گلخانه‌ای، روش‌های بعد از احتراق سهمی مشابه با روش‌های بهبود احتراق داشتند. اما با گسترش فناوری‌های احتراق و طراحی‌های جدید مشعل‌ها، روش‌های بهبود احتراق بیشتر مورد توجه قرار گرفتند. این روش‌ها هزینه‌های انرژی و زیست‌محیطی کمتری دارند اما هنوز در همه سیستم‌ها قابلیت اجرایی ندارند.

دمای بیشینه و زمان ماند در آن دما، احیاء شیمیایی، اکسیداسیون و جذب مرحله‌ای NO_x ، استفاده از جاذب و ترکیب این روش‌ها. این روش‌ها در سیستم‌های احتراقی در سه مرحله؛ قبل، در حین و بعد از احتراق در فناوری‌ها استفاده می‌شوند (Sonia et al., 2005, Cox et al., 1999). هر فناوری که بتواند از تعداد بیشتری از این روش‌ها استفاده کند، راندمان بیشتری در کاهش اکسیدهای نیتروژن دارد. شکل ۱ روند کاهش NO_x در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۴ با



شکل ۱- روند کاهش اکسیدهای نیتروژن با کمک بهبود احتراق و کنترل نشر در دنیا و آمریکا (Popp, 2010)

علاوه بر آن، اختلاط سوخت‌ها هم روشی است که اثرات جانبی کمتری دارد و شرایط عملیاتی را مختل نمی‌کند. تغییر سوخت یک تغییر دائمی است و نیازمند اعمال تغییرات در تجهیزات است. در حالی که اختلاط سوخت راحت‌تر است. اگر ترکیب جدید، نیتروژن کمتری از قبل داشته باشد، کاهش NO_x اتفاق می‌افتد (Tavoulareas, 2005). در صورت جایگزینی سوخت، مهندسی سیستم احتراق باید انجام شود و تمامی اثرات جانبی از جمله راندمان، سیستم کنترل، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و بایستی ارزیابی شوند.

کم کردن مقدار نیتروژن در احتراق

خالص‌سازی سوخت به منظور کاهش نیتروژن، با انتخاب سوخت دارای نیتروژن کمتر مثل گاز طبیعی به جای دیزل یا جایگزینی اکسیژن به جای هوا در احتراق از تولید NO_x جلوگیری می‌کند. به کار بردن روش‌های قبل از احتراق، ساده‌ترین راه برای رسیدن به حد قابل قبول NO_x است. در مناطقی که آلودگی یک مشکل اساسی است می‌توان از این راهکار به عنوان سریع‌ترین روش استفاده کرد. گاز طبیعی و کک یکی از انواع این نوع سوخت‌ها هستند (Skalska et al., 2010).

حذف نیتروژن در هوای احتراق و استفاده از اکسیژن خالص، شعله را خیلی شدید^۱ می‌کند. بنابراین به منظور کنترل شعله، رقیق‌سازی باید انجام شود. تا دمای احتراق را کم کند. این روش هزینه بالایی دارد در حالی که NO_x را فقط تا حدود ۲۰٪ کم می‌کند (Cox et al., 1999, Skalska et al., 2010).

هوای اضافه کمتر (LEA^۲) روی کاهش NO_x تولیدی اثر دارد. در طراحی قدیمی مشعل‌ها، استفاده از میزان هوای اضافی محدودیتی نداشت اما امروزه مشخص شده است که محدودیت هوای اضافی کمتر از ۲٪، میزان NO_x تولیدی را در گازهای دودکش محدود می‌کند. اگرچه در محفظه احتراق محدوده‌هایی غنی از سوخت و محدوده‌هایی فقیر از سوخت وجود دارد ولی هوای اضافی کلی با این روش محدود می‌گردد (Cox et al., 1999, Lani et al., 2005). LEA ساده‌ترین مسیر برای کاهش NO_x است. با این روش هم دمای شعله کم می‌شود و هم مقدار اکسیژن محدود می‌شود و از طرفی مقدار نیتروژنی که همراه هوا وارد محفظه احتراق می‌شود، کاهش می‌یابد. از معایب این روش آن است که چون مقدار اکسیژن کم شده است ممکن است CO و هیدروکربن نسوخته بیشتری حاصل شود و راندمان کاهش یابد. اما کاربرد این روش بسیار ساده است و فقط تغییر وضعیت کنترل به شکل فیزیکی لازم است. این روش در بهبود احتراق بسیار استفاده می‌شود (Richards, 2000).

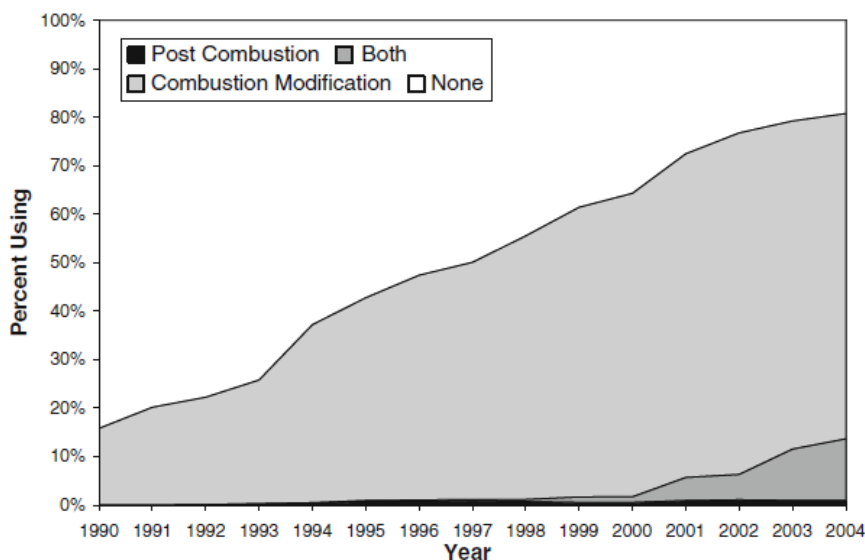
بهینه‌سازی شرایط احتراق

بهبود شرایط احتراق به معنی تغییر دادن شرایط عملیاتی است، به نحوی که میزان تشکیل NO_x کاهش یابد. اولین آزمایشات برای کاهش انتشار NO_x به وسیله بهبود احتراق، در اواخر دهه ۱۹۵۰ انجام شد. اثر میزان اکسیژن روی میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن و همچنین نوع سوخت بررسی شد و مشخص گردید که عامل اصلی تولید NO_x در فرآیند احتراق، دمای آن است (Skalska et al., 2010). همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، تا حدود سال ۲۰۰۰، بهبود شرایط احتراق همواره بیشتر از روش‌های دیگر مورد توجه بوده است (Popp, 2010).

دما کمیتی کلیدی در کنترل NO_x است. تولید NO_x با سینتیک کنترل می‌شود نه با تعادل. پس سرعت واکنش در کنترل تولید NO_x مؤثر است و از آنجا که رابطه سرعت واکنش با دما به تابعیتی آرنیوسی دارد، پس وابستگی شدیدی به دما در تولید NO_x وجود دارد. از طرفی اگر اکسیژن در دسترس، کم باشد مقدار NO_x تولیدی کم می‌شود. با این حال دمای بالا برای داشتن شعله پایدار و انتقال حرارت بیشتر مطلوب است و همچنین کمبود اکسیژن راندمان احتراق را تغییر می‌دهد و می‌تواند شعله را ناپایدار کند و باعث تولید CO و هیدروکربن‌های نسوخته بیشتری شود (Richards, 2000).

محورهای اصلی در فناوری‌های کاهش تولید NO_x در حین احتراق عبارتند از: کاهش دمای بهینه، کاهش زمان ماند در این دما، احیاء اکسیدهای نیتروژن و البته ترکیب روش‌های فوق که راندمان کاهش اکسیدهای نیتروژن را بالا می‌برد. تمامی این روش‌ها باعث کاهش راندمان حرارتی احتراق می‌شود، که امر مطلوبی نیست لذا باید مشخص شود که هدف از احتراق فقط تبدیل انرژی و کسب حداکثر انرژی حرارتی نیست، بلکه هدف تنظیم احتراق در شرایط بهینه است. شرایط بهینه عبارت است از: کسب بیشترین راندمان ممکن همراه با کمترین آلاینده‌گی محیط زیست. کنترل شرایط احتراق، باعث بهینه‌سازی احتراق می‌شود. اندازه‌گیری‌های مداوم شرایط احتراق می‌تواند راندمان بهینه را مشخص کند. نقطه‌ای که هم از لحاظ احتراق و هم از لحاظ آلودگی بهینه باشد. میزان اثرگذاری فناوری‌های بهبود احتراق بستگی به نوع سیستم احتراق دارد. در حالت کلی، روش‌های حین احتراق ۳۰٪ تا ۷۰٪ NO_x را کم می‌کنند و فقط برای توربین‌های گازی این کاهش به ۷۰٪ تا ۸۰٪ می‌رسد (Skalska, 2010). همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، تا حدود سال ۲۰۰۰، بهبود شرایط احتراق همواره بیشتر از روش‌های دیگر مورد توجه بوده است (Popp, 2010).

بهبود شرایط احتراق به معنی تغییر دادن شرایط عملیاتی است، به نحوی که میزان تشکیل NO_x کاهش یابد. اولین آزمایشات برای کاهش انتشار NO_x به وسیله بهبود احتراق، در اواخر دهه ۱۹۵۰ انجام شد. اثر میزان اکسیژن روی میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن و همچنین نوع سوخت بررسی شد و مشخص گردید که عامل اصلی تولید NO_x در فرآیند احتراق، دمای آن است (Skalska et al., 2010). همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، تا حدود سال ۲۰۰۰، بهبود شرایط احتراق همواره بیشتر از روش‌های دیگر مورد توجه بوده است (Popp, 2010).



شکل ۲- روش‌های مورد استفاده در کاهش NO_x در طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۴ (Popp, 2010).

مرحله‌ای کردن احتراق

این روش در سیستم‌هایی استفاده می‌شود که بتوان احتراق را کنترل کرد و مراحل مختلف آن را در نسبت‌های غیراستوکیومتری انجام داد. اگر احتراق در دو یا چند مرحله انجام شود، آنگاه می‌توان در مرحله اول نسبت استوکیومتری را کمتر از مقدار تئوری آن تنظیم کرد. این روش برای سوخت‌هایی با مقادیر مختلف نیتروژن متفاوت است. برای سوخت‌های با نیتروژن زیاد مثل ذغال سنگ در نسبت استوکیومتری احتراق انجام می‌شود. اما برای سوخت‌هایی با نیتروژن کم، مثل نفت یا گاز طبیعی بهتر است که نسبت سوخت به هوا کمی غنی‌تر باشد. در این روش، از احتراق در نسبت استوکیومتری ایده‌آل اجتناب می‌شود. چون در این نسبت، دمای بالاتری ایجاد می‌شود که غلظت بیشتری از NO_x حرارتی تولید می‌شود. در این روش میزان اکسیژن در دسترس بسیار کم است و این محدودیت باعث می‌شود اکسیژن محدود کننده باشد و اکسید نیتروژن تولید نشود. مرحله‌ای کردن احتراق به دو روش ورود هوا به شکل مرحله‌ای یا ورود سوخت مرحله‌ای انجام شود.

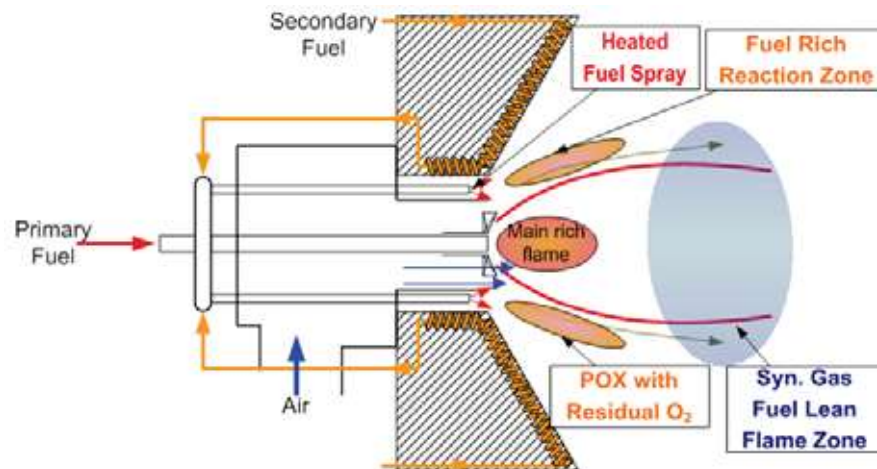
هوای ورودی به صورت مرحله‌ای^۱ به محفظه احتراق

معمولاً به دو جریان تقسیم می‌شود. جریان اولی با سوخت مخلوط می‌شود و تا حدی دمای شعله را تنزل می‌دهد و جریان ثانویه به پایین دست تزریق می‌شود.

در روش دیگر که مرحله بندی ورود سوخت^۲ نام دارد، سوخت عوض هوا به صورت مرحله‌ای وارد می‌شود. سوخت به دو قسمت تقسیم می‌شود. جریان اول احتراق اولیه ایجاد می‌کند و باعث می‌شود نسبت سوخت به هوا کاهش یابد و در جریان دومی به پایین دست احتراق اولیه تزریق می‌شود به نحوی که نسبت خالص سوخت به هوا طوری باشد که کمی اکسیداسیون انجام شود. سوخت اضافی در احتراق اولیه، حرارت را کم می‌کند و دما کاهش می‌یابد. جریان ثانویه می‌تواند سوخت را اکسید کرده و در نتیجه مقداری از NO_x را به نیتروژن احیاء کند. در این نوع احتراق، احتراق خارج از شرایط استوکیومتری^۳ نامیده می‌شود در منطقه اولیه (ابتدای شعله) شرایط غنی از سوخت است و در منطقه ثانویه هم احتراق کامل می‌شود هم کمی از هیدروکربن‌های نسوخته در نقش احیاگر، NO_x ایجاد شده در مرحله قبل را احیاء می‌کنند (Richards, 2000). شکل ۳ شماتیکی از احتراق مرحله‌ای سوخت را نشان می‌دهد (Sewon *et al.*, 2014).

3. Off stoichiometric combustion

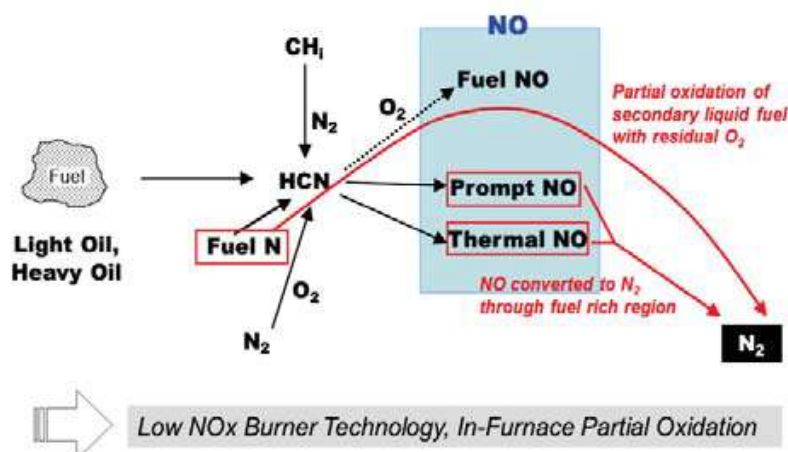
1. Air staging
2. Fuel staging



شکل ۳- شماتیک احتراق مرحله‌ای در مشعل (Sewon et al., 2014)

گیرند. در شکل ۴ واکنش‌های انجام شده در احتراق مرحله‌ای نشان داده می‌شود. در اینجا فقط واکنش اکسیداسیون که همان سوختن است اتفاق نمی‌افتد، واکنش احیاء NO هم مشاهده می‌شود. احتراق مرحله‌ای شرایطی را مهیا می‌کند تا اکسیدهای نیتروژن در محیط احتراق احیاء شوند. در شرایط احتراق غنی از سوخت، سوخت اضافی رادیکال‌های هیدروکربنی موجود، می‌توانند نقش احیاگر را بازی کند (Sewon et al., 2014).

این روش یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل NO_x حرارتی و سوختی است چون می‌تواند مخلوط هوا-سوخت را در محفظه احتراق کنترل کند (Richards, 2000) و اساس طراحی LNB¹ها است. از معایب این روش محدودیت استفاده از هوای اضافی، انتشار CO و ترکیبات نسوخته یا نیمه سوز، دوده گرفتن لوله‌های بویلر، در معرض آتش قرار گرفتن لوله‌های بویلر و امکان خوردگی مخصوصاً اگر در سوخت ترکیبات گوگرد باشد. احتراق مرحله‌ای نیازمند کنترل دقیق اختلاط سوخت و هوا است که نشان می‌دهد سیستم‌های کنترل حتماً باید مورد توجه قرار



شکل ۴- روند تشکیل و احیاء NO (Sewon et al., 2014)

کمک رقیق کردن انرژی ورودی، افزایش دما محدود شود یا تزریق اکسیژن خنک شده به هوای احتراق تا دما کم شود. تزریق گازهای دودکش خنک شده و تزریق بخار آب یا آب هم دمای احتراق را کم می‌کند.

با استفاده از مشعل‌های خارج از سرویس (BOOS^۴) جریانی از مواد داخل محفظه احتراق فرستاده می‌شود تا دمای احتراق را کاهش دهند. ممکن است در سیستم‌های حاوی تجهیزات مشعل‌های چندگانه^۵ مشعل‌هایی باشد که خارج از سرویس باشند. در این مشعل‌ها می‌توان هوا و یا گازهای دودکش را داخل محفظه احتراق فرستاد. در واقع می‌توان با این روش دمای داخل محفظه احتراق را نسبت به حالتی که تمامی مشعل‌ها در سرویس باشند، کم کرد (Cox et al., 1999). BOOS یکی از فناوری‌های مرحله‌سازی سوخت است. سوخت در مشعل‌های منتخب وارد می‌شود ولی در BOOSها می‌تواند فقط هوا جریان داشته باشد. اگر چه مقدار سوختی که به دیگر مشعل‌ها فرستاده می‌شود افزایش می‌یابد ولی مقدار O₂ و همچنین دمای شعله کاهش می‌یابد (Skalska et al., 2010). استفاده از BOOS جهت ورود موادی جهت کاهش دمای احتراق، نیازمند نصب ورودی‌های جدید نیست. این روش می‌تواند احتراق را مرحله‌ای کند و هوا را برای مشعل‌های پایین‌تر کمتر و در مشعل‌های بالاتر بیشتر کند. با این کار مشعل‌های پایین در شرایط غنی از سوخت و مشعل‌های بالا در شرایط غنی از هوا کار می‌کند. استفاده از BOOS در بویلرهای موجود، ظرفیت بویلر را در زمانی که تمامی مشعل‌ها استفاده می‌شوند، کاهش می‌دهد. این روش بیشتر برای بویلرهای مشعل-دیواره‌ای^۶ استفاده می‌شود چون معمولاً انواع دیگر بویلرها قابلیت کار کردن در شرایط سوختی غیرکامل را ندارند (Richards, 2000).

یکی دیگر از روش‌های عمومی در ورود مرحله‌ای هوا در زمانی که هوا به داخل محفظه احتراق تزریق می‌شود، OFA^۷ است و در زمانی که احتراق اولیه در مخلوطی غنی از سوخت انجام شود، احتراق را کامل می‌کند. در این

در توربین‌های گازی سه راهکار اصلی شامل؛ رقیق‌سازی مواد احتراق، کنترل نشر با فرآیند کاتالیستی و طراحی سیستم‌های احتراق از نوع پیش اختلاط رقیق برای کاهش NO_x وجود دارد. این نوع پیش اختلاط می‌تواند شعله نفوذی ایجاد کند. مطالعات درباره مکانیسم‌های ناپایداری این نوع شعله و کنترل آن برای توسعه DLNها در حال پیشرفت است (Kareem et al., 2017). احتراق مرحله‌ای در توربین‌های گازی با روشی به نام پیش اختلاط رقیق^۱، روشی مرسوم و از لحاظ هزینه به صرفه است، انجام می‌شود. در این روش، احتراق در سوخت رقیق انجام می‌شود به طوری که نسبت سوخت به هوا می‌تواند به نصف مقدار استوکیومتری برسد. البته در توربین‌های گازی هم به منظور تکمیل احتراق یک شعله ثانویه لازم است. سازنده‌ها میزان NO_x را بین ۲۵-۹ ppm بر اساس سطح ویژه توربین گازی تضمین می‌کنند. احتراق مرحله‌ای در توربین‌های گازی معمولاً به روش DLN^۲ یا DLE^۳ یا SOLONO_x معروف است (Skalska et al., 2010). اصطلاح خشک برای این به کار می‌رود که اولین روش‌های پیشنهادی جهت کاهش NO_x در توربین‌های گازی، استفاده از بخار آب بود که به روش مرطوب معروف شد. در اواسط دهه ۱۹۸۰، نازل‌های احتراقی چندگانه در توربین‌های گازی نصب شد. این فناوری در نسل جدید توربین‌های گازی میزان انتشار NO_x را برای واحدهای گاز سوز به ۲۵ ppm و برای واحدهای سوخت مایع ۴۲ ppm کرد. این تغییر در طراحی مکانیکی نیاز به تزریق آب یا بخار آب را به عنوان اولین راه حل در کاهش NO_x در توربین‌های گازی حذف کرد (Cox et al., 1999).

اضافه شدن جریان‌های ثانویه به محفظه احتراق

در این روش به کمک سوخت، هوا، گازهای حاصل از احتراق یا بخار آب، مقدار حرارت تولیدی کم می‌شود و دما خیلی بالا نمی‌رود. جریان‌های کم‌کننده دمای احتراق می‌توانند یا استفاده از رقیق‌کننده‌های سوخت باشد تا به

5. Multiple burner
6. Wall-fired
7. Over Fire Air

1. Lean premix
2. Dry low NO_x
3. Dry low emission
4. Burner out of service

نسوخته و CO را افزایش دهد. برای استفاده از OFA در کنترل NO_x باید سیستم کنترل بویلر ارزیابی شود و بهبود یابد. کنترل کردن مقدار سوخت و هوا لازم است تا بتوان مقدار مناسب را به مشعل رساند تا مسیر ورودی هوا در OFA را کنترل کند. توانایی کنترل مقدار هوا هم در نسبت بالا و هم پایین و امکان قرارگیری کانال‌های هوای جدید در خارج از واحد از پارامترهای مهم برای تصمیم‌گیری مخصوصاً در واحدهای قدیمی در این زمینه است (Richards, 2000).

کاهش دبی هوای پیش‌گرم^۱ هم یکی از روش‌های کاهنده دمای احتراق است. هوا معمولاً به کمک گازهای دودکش کمی گرم می‌شود تا افت حرارتی کم شود و راندمان بالا رود. اگرچه این فرآیند می‌تواند دمای احتراق را تا حدود تشکیل NO_x بالا ببرد ولی با کاهش هوای پیش‌گرم، دمای احتراق کم می‌شود. در این روش راندمان بویلر کاهش می‌یابد اما می‌تواند میزان تولید NO_x را محدود کند. با کاهش دما در محفظه احتراق ثانویه دمای پیک در محفظه احتراق کاهش می‌یابد. از آن‌جا که کاهش هوای پیش‌گرم بر مبنای کاهش دمای پیک است در کاهش NO_x حرارتی مؤثر است و برای سوخت‌هایی که نیتروژن کم دارند مناسب است. برای استفاده از این روش باید یک توازن بین کاهش NO_x و راندمان بویلر ایجاد شود. وقتی هوای پیش‌گرم کنار گذاشته شود ممکن است دمای گازهای دودکش بالا رود و سپس راندمان بویلر کاهش یابد.

بازچرخانی گازهای دودکش خنک شده FGR، دما را کاهش می‌دهد. جریان FGR، همانند یک گاز همراه، غلظت اکسیژن را مخصوصاً در منطقه احتراق ثانویه، کم می‌کند پس با رقیق کردن میزان اکسیژن هوای احتراق، NO_x کمتری تولید می‌شود. در این روش جرم گازهای دودکش بیشتر می‌شود. گرمایی که جرم بیشتری مواد با خود حمل می‌کنند می‌تواند توسط یک مبدل گرمایی بازیافت شود. همان‌طور که قبلاً هم ذکر شد اگر دمای احتراق زیر ۷۰۰ درجه سلسیوس نگه داشته شود میزان

روش، احتراق در خارج از مقدار استوکیومتری اتفاق می‌افتد پس دمای احتراق پایین نگه داشته می‌شود. بعد از احتراق به کمک این روش بقیه سوخت اکسید می‌شود. در این روش معمولاً دیگر نیازی به کاهش هوای اضافی نیست (Cox et al., 1999). می‌توان هوا را بالای منطقه نرمال احتراق وارد کرد. در نتیجه دو منطقه غنی از سوخت و منطقه دمای پایین‌تر، فقیر از سوخت ایجاد می‌شود (Skalska et al., 2010). در OFA نازل تزریق جداگانه در بالای سر مشعل نصب می‌شود. تقریباً ۲۰-۱۵ درصد هوای احتراق می‌تواند از نازل‌های OFA وارد محفظه احتراق شود. استفاده از OFA نیازمند وجود کانال‌هایی در بویلر است به نحوی که بتواند از دیواره‌ها هوا را داخل بویلر بفرستد. این روش نیازمند تغییرات در سیستم هوا رسانی بویلر است تا هوا به محفظه احتراق ثانویه برسد. هم‌چنین باید فضای کافی بالای مشعل باشد تا قبل از مبدل‌های گرمایی، زمان کافی برای واکنش احتراق وجود داشته باشد. به خاطر محدودیت‌ها در ساختار بویلر برای بعضی از بویلرهای موجود از جمله نفتی یا گازی استفاده از این روش امکان‌پذیر نیست. این روش مدام در حال بهبود است در OFA پیشرفته، تزریق هوا با سرعت خیلی بالا است به نحوی که اختلاط زیادی در منطقه احتراق ایجاد شود. این روش دمنده‌هایی با توان بیشتر برای تزریق هوا نیاز دارد تا سرعت هوا را بالا ببرند (Richards, 2000). استفاده از این روش ممکن است خوردگی را در منطقه غنی از سوخت بالا ببرد. چون آن فضا را کوچکتر می‌کند و در نتیجه دیواره‌ها بیشتر در معرض هستند.

اکثر بویلرها از سال ۱۹۷۱ همراه با اجزاء OFA ساخته می‌شوند تا بتوانند احتراق مرحله‌ای ایجاد کنند. با این کار ۳۰-۴۰ درصد از انتشار NO_x کم می‌شود. در واحدهای قدیمی خیلی سخت است که بتوان شرایط OFA را فراهم کرد. یکی از محدودیت‌های اصلی کاهش حجم کوره و ظرفیت فن‌ها است چون سرعت‌های نامناسب ممکن است باعث اختلاطی در واحد شود که مقدار هیدروکربن‌های

اضافه شده به مقدار جزئی در احیاء NO_x در مشعل استفاده می‌شود و مابقی آن در مراحل بعدی توسط هوا یا OFA سوخته می‌شود. این روش در زمانی مؤثر است که زمان ماند از $0/2$ ثانیه تا $1/2$ ثانیه باشد (Cox et al., 1999). اساس باز سوزی گازهای سوخت (FR) این است که مقداری از سوخت ($10-25\%$) بالای شعله اصلی، در منطقه جداگانه دوباره سوزی وارد شود. در منطقه احتراق ثانویه، NO_x ایجاد شده در منطقه احتراق اولیه ممکن است، تجزیه شود چون NO_x توسط هیدروکربن‌ها احیاء می‌شود. از آن جا که مقدار سوخت اضافه شده به مقدار ناچیزی در احیاء NO_x سهمیم است لذا بالای منطقه دوباره سوزی وارد می‌شود تا به طور کامل بسوزد (Skalska et al., 2010). چون این منطقه نزدیک لوله‌های سوپرهیتر است احتمال نشت کربن روی آن بالا می‌رود و راندمان حرارتی بویلر را کم می‌کند و هم‌چنین مقدار خاکستر و کربن موجود در آن را افزایش می‌دهد. مناسب‌ترین سوخت در این مرحله، گاز طبیعی است چون آلاینده‌گی کمتری دارد اما اگر از ترکیبات سوخت مایع استفاده می‌شود هرچه اندازه قطرات آن کوچکتر باشد اثرات نامطلوب این فرآیند کمتر می‌شود. نصب سیستم دوباره‌سوزی در تمامی بویلرها، می‌تواند جریان گازی با زمان اقامت بیشتر ایجاد کند و زمان برای سوختن دوباره و احتراق، کامل شود. دوباره سوزی می‌تواند بر روی مشعل‌های موجود انجام شود. در قیاس با شرایط موجود، نصب و اضافه کردن تجهیزات اضافی برای دوباره‌سوزی می‌تواند میزان انتشار NO_x را کاهش دهد. فناوری دوباره سوزی می‌تواند در تمام بویلرهایی که فضای اضافی دارند استفاده شود یک فاصله مناسب بین منطقه احتراق اولیه و منطقه دوباره سوزی لازم است تا زمان لازم برای واکنش احتراق ایجاد شود. زمان ماند حداقل $0/3$ ثانیه بیشترین اثرگذاری را دارد. کاهش NO_x همراه با دوباره‌سوزی می‌تواند بین 40% تا 70% باشد و مقدار کمی SO_2 ، CO_2 و مواد معلق کاهش می‌یابد. البته میزان کاهش آن بسیار کمتر از کاهش NO_x است. این کاهش کمی به خاطر

NO_x حرارتی تولیدی قابل صرفنظر کردن است (Cox et al., 1999). در یک سیستم احتراق مرحله‌ای می‌تواند مقداری از گازهای دودکش برگشتی را به جریان هوای ثانویه تزریق کند. این روش هم دمای شعله و هم‌چنین غلظت اکسیژن را کم می‌کند. محدودیت آن در این است که نباید میزان گازهای برگشتی آنقدر زیاد باشد که شعله را ناپایدار کند (Skalska et al., 2010). این روش برای بویلرهای بزرگ قابل استفاده است به طوری که $30-10\%$ درصد گازهای دودکش به داخل محفظه اصلی احتراق برگردد. در مشعل‌های گازی یا نفتی با FGR، بین $30-20\%$ درصد می‌توان NO_x را تا بین $50-40\%$ درصد کم کرد. مقدار زیاد FGR (بیشتر از 30%) شعله را ناپایدار می‌کند و می‌تواند CO و هیدروکربن‌های نیمه سوخته را افزایش دهد. هزینه سرمایه گذاری FGR بیشتر از LEA است. به فن‌های با قابلیت کار در دمای بالا، کانال‌ها و فضای زیاد برای برگشت دادن گازها نیاز است. FGR همراه با OFA می‌تواند راندمان حذف NO_x را کم کند. بعضی از مشکلات عملیاتی ممکن است در FGR ایجاد شود از جمله؛ ناپایداری شعله، کاهش راندمان مبدل حرارتی و میعان بعضی از ترکیبات نسوخته (اکسیداسیون جزئی) در سطوح انتقال حرارت داخلی. نسل جدید فناوری FGR داخلی است به طوریکه گازهای دودکش با نیروهای آئرونامیک در محفظه به چرخش درآیند، در این روش دیگر نیازی به فن جریان گردشی دودکش نیست (Richards, 2000).

باز احتراق سوخت FR^1 روشی مشابه FGR است اما بازگشت گازهای دودکش خنک شده به همراه کمی سوخت که به آن اضافه شود اعم از گاز طبیعی، اسپری نفت و ... اتفاق می‌افتد. این روش هم مقدار گرما را کم می‌کند. احتراق اولیه در دمای پایین‌تری اتفاق می‌افتد و هم‌چنین زمانی که این جریان در مرحله احتراق ثانویه اضافه شود، وجود سوخت شیمیایی همراه گازهای دودکش باعث می‌شود که NO_x تولیدی در مرحله اول احتراق احیاء شود و به نیتروژن تبدیل گردد. البته سوخت

سیستم را ۳-۲ درصد کاهش می‌دهد؛ اما با توجه به افزوده شدن دبی آب و افزایش کلی دبی جریان خروجی از احتراق، توان خروجی ۵-۶ درصد افزایش می‌یابد. راندمان کاهش NO_x با این روش حدود ۸۵-۷۰ درصد است اگرچه باید شرایط عملیاتی و دیگر آلاینده‌ها هم مدنظر قرار بگیرد. نسبت مقدار آب به ازای سوخت در توربین گازی می‌تواند بین ۰/۲ تا ۱ باشد. آب مصرفی حتماً باید DM باشد چون اجزاء معدنی می‌توانند به توربین گازی آسیب بزنند. تزریق بخار نیازمند اضافه کردن سیستم تامین بخار (بویلر) است ولی تزریق آب مایع، تجهیزات کمتری می‌خواهد و اثرات بیشتری در خنک سازی دارد. این روش، غلظت CO و هیدروکربن‌های نسوخته منتشر شده از توربین را افزایش می‌دهد. به عنوان مثال با استفاده از نسبت سوخت به آب یک به یک، میزان انتشار CO تقریباً پنج برابر شده است (Richards, 2000). اگرچه می‌توان به کمک یک بستر کاتالیستی یا مشعل‌های بعد از آن و مراحل احتراقی بعدی آن‌ها را سوزاند. این روش می‌تواند سوخت و گرما را در این سیستم‌های احتراقی هدر دهد اما می‌تواند این هدر رفت در بویلرهای بعدی بازیابی شود.

در دهه ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ اولین گزینه برای کنترل NO_x در توربین‌های گازی تزریق آب یا بخار آب بود در توربین‌هایی که هیچ سیستم کنترل NO_x نداشتند با این روش میزان NO_x از ۲۵۰-۱۵۰ ppm به ۷۵ ppm رسید (Cox et al., 1999). ممکن است در هنگام تزریق آب در توربین‌های گازی، محدودیت‌های مکانیکی مثل: نوسانات فشار دینامیک احتراق، ناپایداری شرایط احتراق، افزایش CO، دبی حرارتی، متوقف شدن شعله، اتفاق بیفتد. پالس‌های فشاری ممکن است به توربین و مخصوصاً محفظه احتراق آسیب بزنند. برای اجتناب از ایجاد چنین ناپایداری حرارتی، نازل‌های چندگانه طراحی شدند. به عنوان مثال با نصب شش نازل بدون آن‌که اختلالی ناشی از فشار دینامیک پالسی ایجاد کند NO_x از ۴۲ ppm به ۲۵ ppm رسیده است. استفاده از بخار آب در قیاس با آب در فاز

جایگزینی سوختی پاک‌تر (گاز طبیعی) به جای درصد کمی از سوخت اولیه است، که در مرحله دوباره سوزی وارد شده است. بر مبنای نوع فناوری هزینه نصب به شدت تغییر می‌کند و مقدار آن به طراحی بویلر وابسته است. دو شرط عمده در طراحی سیستم دوباره سوز وجود دارد اول این که سوخت باید در جایی تزریق شود که دما در محدوده ۸۷۰-۱۲۰۰ درجه سلسیوس باشد. دوم این که زمان ماند برای واکنش دوباره سوزی حداقل ۰/۳ ثانیه باشد. مسیرهای طراحی برای هر بویلر تغییر می‌کند سیستم دوباره سوزی می‌تواند همراه یا بدون جریان گاز همراه^۱ طراحی شود. استفاده از جریان گاز همراه مثل گاز برگشتی دودکش معمولاً در بویلرهای بزرگ قابل انجام است (Richards, 2000).

نصب مشعل‌های جدید برای دوباره سوزی و مسیرهای لازم در دیواره بویلر به معنی آن است که بویلر برای مدتی از سرویس خارج شود تا تغییرات مورد نظر در دیواره بویلر اعمال شود و مشعل جدید نصب شود. اگر هوای زیادی به منطقه دوباره سوزی وارد شود انتقال حرارت تضعیف می‌شود و اتلاف در لوله‌های بویلر بالا می‌رود، در زمانی اتفاق می‌افتد که بار بویلرها کم بوده یا دوباره سوزی از سرویس خارج باشد. داده‌های اولیه نشان می‌دهد که اتلاف حرارت به خاطر موارد فوق چندان مهم نیست اما به نظر می‌رسد بررسی گرفتگی بویلرها و خاکستر روی لوله‌ها و اتلاف حرارتی بویلر نیازمند مطالعه بیشتر است (Richards, 2000).

تزریق آب یا بخار آب هم روش دیگری است که با افزودن مولکول‌های آب به محفظه احتراق، سرعت واکنش احتراق را کمتر می‌کند هر دوی این اثرات می‌تواند باعث کاهش دمای احتراق شود اگر دما به اندازه کافی کم شود NO_x حرارتی بسیار کم تشکیل می‌شود. برای کاهش دمای احتراق، بخار آب یا آب می‌تواند با جریان هوا ترکیب شود. این روش دمای احتراق را در توربین‌های گازی به زیر ۱۱۰۰ درجه سلسیوس می‌رساند که میزان NO_x را به حدود ۴۰ ppm می‌رسد. این روش کنترل مرطوب راندمان

2. blow off, flame out

1. Carrier

است. احتراق جزئی که همراه با یک کاتالیست اتفاق می‌افتد و دما به حدی است که NO_x تولید نمی‌شود و احتراق نهایی در پایین دست همراه با یک واکنش همگن بدون شعله است. فقط مقدار کمی NO_x در مرحله دوم احتراق ایجاد می‌شود. این فناوری در آینده بسیار مورد استفاده قرار خواهد گرفت ولی در حال حاضر کاربرد تجاری کمی پیدا کرده است (Richards, 2000).

یک مدل از سیستم‌های سیکل ترکیبی سیستم IGCC^3 است در این نوع سیستم، سوخت در شرایط احیاء به گاز سنتز تبدیل می‌شود. این نوع گاز کاملاً تمیز می‌سوزد. به نظر می‌رسد IGCC یکی از چندین فناوری کلیدی در کاهش آلاینده‌ها است تاکنون کاربرد آن خیلی محدود بوده و احتمال دارد در ۲۰۲۰ تجاری شود (Lani et al., 2005).

بحث

یکی از بهترین روش‌های کاهش مقدار اکسیدهای نیتروژن، ممانعت از تشکیل آن است که می‌تواند با کم کردن مقدار نیتروژن در احتراق با استفاده از هوای اضافی کمتر و با سوخت با مقدار اتم نیتروژن کمتر به عنوان ساده‌ترین راه حل عملی شود. بهینه‌سازی شرایط احتراق و مشخص شدن شرایط عملکردی که بالاترین راندمان را همراه با کمترین آلاینده دارد تا ۷۰٪ می‌تواند میزان اکسیدهای نیتروژن را کم کند. مرحله‌ای کردن احتراق، اضافه کردن جریان‌های ثانویه مثل؛ جریان هوا (OFA)، گازهای دودکش (FGR) جریان گاز طبیعی همراه گازهای دودکش (FR)، جریان آب یا بخار آب به محفظه احتراق، میزان NO_x را تا حد چشمگیری کاهش می‌دهد. استفاده از احتراق کاتالیستی یا احتراق گازهای سنتز میزان NO_x را به کمتر از ۵ppm می‌رساند.

در انتخاب روش مناسب برای کاهش اکسیدهای نیتروژن، باید کمیت‌های متعددی لحاظ شوند از جمله: نوع سوخت، فناوری احتراق، شرایط عملیاتی، ویژگی‌های

مایع اختلاط بهتری با سوخت دارد. ولی نابسامانی کمتری در مشعل ایجاد می‌کند که باعث می‌شود علاقمندی به استفاده از بخار آب بیشتر شود (Skalska et al., 2010) در تزریق آب در توربین گازی میزان نسبت آب به سوخت، نسبت فشار کمپرسور، نسبت سوخت به هوا و ... باید بررسی شود. این روش اگرچه برای مدت مدیدی در توربین‌های گازی استفاده شده است و مزایایی از جمله بالا بردن راندمان توربین علاوه بر کاهش NO_x دارد، اما نصب آن تجهیزات مثل: تانک ذخیره آب، ژنراتور بخار، نازل آب یا بخار آب، پمپ فشار بالا و ... می‌خواهد که پیچیدگی سیستم را بالا می‌برد هم‌چنین وزن، اندازه و قابلیت اعتماد پذیری سیستم را تغییر می‌دهد (Kareem et al., 2017). در بویلرهای موجود، تزریق آب یا FGR بر روی پایداری شعله اثر می‌گذارد که باید در اعمال این تغییرات لحاظ شود. قابلیت دیگر اجزاء مثل قدرت دمنده هوا و ... هم باید لحاظ شود. دو نوع بویلرهای شعله دیواری و مماسی پایین خشک در اولویت بهبود شرایط احتراق هستند (Timothy, 2001).

تغییر نوع احتراق

احتراق کاتالیستی^۱ به معنی استفاده از کاتالیست در حین احتراق است. کاتالیست، دمای احتراق را به دمای کمتر از تشکیل NO_x هدایت می‌کند. پس می‌تواند جزو روش‌های محدود کننده دما باشد. با استفاده از این روش، میزان NO_x تولیدی در گازهای دودکش به کمتر از ۱ppm می‌رسد. این فناوری هزینه سرمایه‌گذاری، عملیاتی و نگهداری نسبتاً بالایی دارد چون هزینه تعویض کاتالیست بالا است و نیاز به تعویض به خاطر غیرفعال شدن ناشی از ناخالصی‌های سوخت وجود دارد؛ اما این فناوری کمترین سطح از NO_x حرارتی را ایجاد می‌کند. سیستم احتراق کاتالیستی در توربین‌های گازی به XONON معروف است. این فرآیند می‌تواند در شرایط بدون شعله^۲ با کاتالیست در دمای پایین، میزان NO_x را به ۳ppm برساند. این سطح پایین NO_x همراه با انتشار CO تا ۱۰ppm است. در این نوع سیستم، احتراق مرحله‌ای

3. Integrated gasification combined cycle

1. Catalytic combustion

2. Flame less

هم‌چنین نسبت بین مقدار هوا-سوخت، درجه اختلاط هوا- سوخت و نحوه توزیع محصولات احتراق هم بر میزان تولید NO_x مؤثر است. در جدول ۲ انواع روش‌های مذکور به همراه توضیحاتی در مورد میزان کاهش اکسیدهای نیتروژن و مزایا و معایب آن‌ها ارائه شده است.

فرآیندی، امکان نصب تجهیزات جدید، مشخصات گازهای احتراق (اعم از غلظت اکسیدهای نیتروژن، دما، رطوبت، ذرات معلق، دبی و ...)، حد مجاز آلاینده، اثرات جانبی آلاینده، ایمنی عملیات و قابلیت اطمینان بخشی فرآیند و هزینه‌ها. دمای بالاتر، NO_x بیشتری تولید می‌کند.

جدول ۲- مقایسه و میزان اثرگذاری روش‌های کاهش اکسیدهای نیتروژن در محفظه احتراق

روش	روش کاهش NO_x	مزایا	معایب	تخمین میزان کاهش NO_x (%)
LEA	کاهش میزان اکسیژن در دسترس	تنظیم راحت، مناسب برای واحدهای موجود	افزایش میزان CO	۱۰-۴۴
BOOS	احتراق مرحله‌ای	هزینه اولیه ندارد، برای واحدهای موجود مناسب است	محدود به بویلرهای با سوخت مایع و گاز، افزایش میزان CO	۱۰-۷۰
OFA	-	مناسب برای همه سوخت‌ها	افزایش میزان CO، هزینه اولیه بالا	-
FGR	کاهش دمای شعله	راندمان بالای کاهش NO_x برای سوخت‌های با نیتروژن کم	هزینه‌های اولیه و عملیاتی بالا، اثر نامطلوب در میزان انتقال حرارت و فشار سیستم، افزایش ناپایداری شعله	۲۰-۵۰
توزریق آب/بخار آب	کاهش دمای شعله	هزینه سرمایه‌گذاری کم	کاهش راندمان، افزایش توان لازم فن	۷۰-۸۰
FR	توزریق سوخت برای واکنش با NO_x	هزینه معمولی	افزایش زمان ماند، احتراق ناقص، نامناسب برای واحدهای موجود	۵۰-۶۰
LNB	احتراق مرحله ای درون شعله (مرحله سازی هوا، سوخت یا استفاده از FGR)	هزینه عملیاتی پایین، برای بهینه سازی واحدهای موجود مناسب است.	هزینه سرمایه گذاری بالا	تا ۲۰

تشکر و قدردانی

نویسندگان از پژوهشگاه نیرو و هم‌چنین انجمن احتراق ایران سپاسگزاری می‌نمایند.

- fired Power Plants. Environ Resource Econ. Vol. 45, pp: 319–352.
7. **Richards, J.R., 2000.** Control of Nitrogen Oxides Emissions. EPA. www.epa.org.
 8. **Sewon, K.; Changyeop, L. and Minjun, K., 2014.** Low NO_x Combustion Technology for Minimizing NO_x, International Scholarly and Scientific Research & Innovation. Vol. 8, No. 12, www.scholar.waset.org.
 9. **Skalska, K.; Miller, J. S. and Ledakowicz, S., 2010.** Trends in NO_x abatement: A review, Science of the Total Environment. Vol. 408, pp: 3976–3989.
 10. **Sonia, Y.; Edward, S.R.; Margaret, R.T. and David, A.H., 2005.** Technology Innovations and Experience Curves for Nitrogen Oxides Control Technologies, J. Air & Waste Manag. Assoc. Vol. 55, No. 12, pp: 1827-1838.
 11. **Tavoulareas, S. and Wojciech, J., 2005.** Multipollutant Emission Control Technology Options for Coal-fired Power Plants, EPA. www.epa.org.
 12. **Timothy, W., 2001.** Burner technology for single digit NO_x emission in boiler applications. CIBO NO_x Control XIV Conference. San Diego.
- منابع**
1. **Basfar, A.A.; Fageeha, O.I.; Noushad, K.; Andrzej, C.; Janusz, L.; Andrzej, P.; Zbigniewand, Z. and Jerzy, W., 2010.** A review on electron beam flue gastreatment (EBFGT) as a multicomponent air pollution control technology. Nukleonika. Vol. 55, No. 3, pp: 71–277.
 2. **Birol, F. and Piddle, R., 2016.** Energy and Air Pollution. International Energy Agency. www.iea.org
 3. **Cox, L.; Eddinger, J.; Grano, D. and Vatauk W., 1999,** Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled. EPA. www.epa.org
 4. **Kareem, Kh.; Yehia, E. and Kassaby, M., 2017.** Toward lower gas turbine emissions: Flameless distributed combustion. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 67, pp: 1237–1266.
 5. **Lani, B.W.; Feeley, T.J.; Murphy, J. and Green, L., 2005.** A review of DOE/NETL's advanced NO_x control technology R&D program for coal-fired power plants. DOE/NETL's NO_x R&D Program Review.
 6. **Popp, D., 2010.** Exploring Links between Innovation and Diffusion: Adoption of NO_x Control Technologies at US Coal-

Methods of Reducing the Production of Nitrogen Oxides in the Combustion Chamber

Samane Komeili^{1*}, Abdollah Mostafaei¹, Morteza Jalali Lichaei¹

^{1*} - Environmental Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

Abstract

A review about NO_x reduction methods in stationary combustion chamber was prepared. The influences of them on NO_x reduction were considered and compared. these methods were; fuel changing, low excess air, combustion modification and staging, adding secondary flow in combustion chamber to reduce maximum temperature and oxygen concentration, NO_x reduction and produce nitrogen molecule in combustion chamber and catalytic combustion. Each combustion systems can use one or more of these methods to reduce NO_x up to 70%. The amount of NO_x reduction dependent on the parameters like: type of fuel, technology of combustion, operation condition, mandatory to prepare new apparatus, flue gas composition, standards limitation, side effects of pollutant, safety, reliability and cost.

Key words: Nitrogen Oxide, Combustion, Flame, Staging, Excess Air