

بررسی عددی محفظه احتراق نیروگاه رامین به منظور مطالعه عوامل مؤثر بر تولید آلاینده‌های مونوکسید کربن و اکسید نیتروژن

امین تاجداني^۱ ، دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، کارشناس نیروگاه رامین اهواز

۱- دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه کاشان - کاشان- ایران

tajdani.amin@gmail.com

چکیده: بویلر یکی از مهم‌ترین و در ضمن آسیب پذیرترین قسمت‌های یک نیروگاه می‌باشد که وظیفه آن تولید بخار برای به حرکت در آوردن توربین‌ها می‌باشد. جهت افزایش راندمان حرارتی در نیروگاه باستی از هدرروی حرارت در محفظه احتراق بویلرها جلوگیری کرد و به صورت همزمان پارامترهای آلاینده محیط زیست مانند NO_x و CO کنترل پارامترهای آلاینده محیط زیستی باعث افزایش مصرف سوخت، پارگی واتروالها و سوپرھیترها و درنتیجه از مدار خارج شدن یک واحد نیروگاه می‌شود که خسارتهای اقتصادی زیادی به نیروگاهها و محیط زیست وارد می‌کند. لذا در این تحقیق سعی شده است که همزمان با مدل‌سازی مشعل بویلر نیروگاه رامین اهواز پارامترهای محیط زیستی خروجی محفظه احتراق بررسی شود و تأثیر آن در شکل شعله و راندمان حرارتی بویلر و همچنین میزان آلاینده‌های CO و NO_x را در اثر تغییر در شرایط بفره برداری (اعمال هوای اضافی به کوره - تغییر در دبی هوای ورودی - تغییر در دبی هوای خروجی) مورد اندازه گیری و پایش قرار گرفته است. نتایج کار بدین شکل است که با کنترل سطح اکسیژن، تنظیم نمودن مسیرهای سوخت به مشعل، میزان جریان در مسیرهای سوخت، اندازه گیری و کنترل جریان هوای اولیه و هوای دمنده، کنترل دقیق نسبت هوا به سوخت کنترل، نوسان مکانیکی مشعلها و دمپرهای کیفیت سوخت مصرفی، میزان تولید آلاینده را تخمین زده و برنامه ریزی موثری برای کاهش تولید آلاینده‌های NO_x و CO داشته باشد.

کلمات کلیدی : بررسی عددی احتراق بویلر - آلاینده‌های NO_x و CO نیروگاه رامین اهواز - مطالعه عوامل مؤثر بر تولید آلاینده‌های مونوکسید کربن و اکسید نیتروژن

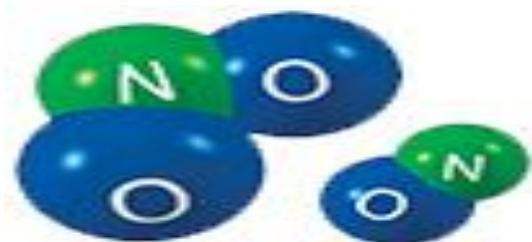
تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۱۰/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول : امین تاجداني

نشانی نویسنده‌ی مسئول : اهواز - نیروگاه رامین اهواز

گازی بی ضرر است، اکسیدهای ازت برای انسان خطرناک هستند. تعداد اکسیدهای ازت زیاد است ولی در میان آنها دو آلوده کننده‌ی مهم، اکسید نیتریک (NO) و دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) می‌باشند. اکسید نیتریک (NO)، گازی بی رنگ و تا حدی سمی است که به هنگام احتراق و در حرارت نسبتاً بالا تولید می‌شود. حرارت احتراق به حدی بالا است که مناسب ترکیب اکسیژن و ازت هوا می‌باشد. چنین حرارتی فقط در کوره‌های قوی و یا احتراق در فشار بالا تولید می‌شود. بدین جهت گاز NO به مقدار زیاد در سیلندرهای اتومبیل، نیروگاههای حرارتی و سایر اعمال تبدیل انرژی تولید می‌گردد. مقداری از گاز NO که نسبتاً بی خطر است در اتمسفر تبدیل به گاز دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) می‌شود که گازی بسیار خطرناک است. شکل شماره ۲ [۲].



شکل (۲): ساختار مولکولی مونوکسید نیتروژن و دی اکسید نیتروژن

تا به حال دو منبع عمده برای اکسیدهای نیتروژن در خلال احتراق
شناخته شده است:

- اکسیدهای نیتروژن حرارتی (ناکس حرارتی) که در روند احتراق به همراه اکسیژن به اندازه کافی گرما می گیرد (دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه کلوین) در این حالت نیتروژن اکسید می شود.

این سینتیک بر مبنای مکانیزم توسعه یافته زلدویچ^۱ مبتنی بر اکسیداسیون مستقیم نیتروژن شکل می گیرد. این مدل در دماهای بالا (بیش از K_{180}) اهمیت بسیاری پیدا می کند، زیرا انرژی مورد نیاز برای شکستن پیوند بین دو اتم نیتروژن بسیار بالاست (945KJ/mol) و این انرژی تنها در دماهای بالا تأمین می شود.

همچنین با هر K_{90} افزایش دما در دماهای بالاتر از K_{180} ، میزان اکسیدهای نیتروژن حرارتی تولیدی حدود دو برابر می شود و بیشترین درصد اکسیدهای نیتروژن تولید شده را شامل می شوند.

مکانیزم توسعه یافته زلدویچ به صورت زیر تعریف می شود:



١ - مقدمة

مهمترین منبع ایجاد آلاینده‌های هوا از نظر کمی و کیفی در نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی، فرایند احتراق سوخت می‌باشد. آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت که مهمترین آن‌ها اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، منواکسید کربن و ذرات معلق می‌باشند از طریق دودکش‌های نیروگاه به اتمسفر تخلیه می‌گردند. کنترل آلودگی هوا در نیروگاه‌ها را می‌توان از طریق تغییر در فرایند و نحوه احتراق یا نوع سوخت مصرفی، میزان تولید و انتشار آلاینده‌ها به اتمسفر را کاهش داد. به عنوان مثال با استفاده از مشعل‌های ویژه ای می‌توان میزان تولید اکسیدهای نیتروژن را کاهش داد. همچنین با تغییر سوخت از انواع سوخت‌های مایع و گاز طبیعی از تولید و انتشار اکسیدهای گوگرد جلوگیری کرد. کنترل آلاینده‌های هوا از طریق به کارگیری سیستم‌های تصفیه دود و حذف آلاینده‌ها از دود خروجی و رساندن غلظت آن‌ها به حداقل غلظت مجاز نیز امکان پذیر است. نهایتاً و با در نظر گرفتن رویکردهای مذکور، برای کاهش اثرات آلودگی در محیط اطراف با انتخاب مناسب ارتفاع و قطر دودکش نیروگاه باعث پخش هر چه بیشتر آلاینده‌ها در اتمسفر و کاهش غلظت آن‌ها در ارتفاع تفسیه در محیط اطراف نیروگاه گردید. [1].

۲- کربن مونوکسید

(Carbon monoxide) با فرمول شیمیایی CO، گازی است که بر اثر سوختن ناقص کربن بوجود می‌آید. این گاز بسیار سمی است اما رنگ و بوی خاصی ندارد. به همین دلیل کربن مونوکسید قاتل نامرئی نامیده می‌شود. میل ترکیبی کربن مونوکسید با هموگلوبین خون حدود ۲۰۰ برابر بیشتر از میل ترکیب گاز اکسیژن است. در خون انسان حدود ۵ درصد کربن مونوکسید وجود دارد اما اگر این مقدار به ۲۰ درصد رسد باعث مگ خواهد شد شکار شماره ۱.



شکل (۱): ۱۱۲.۸ pm پیکومتر فاصله میان کربن و اکسیژن است.

۳- ناکسہ چیست

ترکیبات NO_x اشاره به اکسیدهای نیتروژن دارد که شامل نیتروژن مونواکسید (NO) که بعنوان نیتریک اکسید نیز شناخته می‌شود و نیتروژن دی اکسید (NO_2) است. هم‌چنین می‌تواند شامل دیگر ترکیبات نیتروژن و اکسیژن که کمتر متداول‌اند مثل نیتروژن تتراتراکسید (N_2O_4) و نیتروژن پنتاکسید (N_2O_5) نیز باشد. برخلاف ازت (گازی) سطحی و بی‌نشکنا، دهنده ۷۸٪ اتمسفر) که

تشکیل نمی‌شود، بلکه به صورت غیر مستقیم و از سیناید هیدروژن (HCN) تولید شده در محفظه احتراق شکل می‌گیرد. از آنجا که انرژی لازم برای شکستن پیوند بین اتم کربن و نیتروژن (791KJ/mol) کمتر از انرژی لازم برای شکستن پیوند دو اتم نیتروژن می‌باشد، لذا این مکانیزم تشکیل اکسید نیتروژن در دماهای پایین تر از ۱۸۰۰K اهمیت بیشتری می‌یابد. مکانیزم تشکیل اکسید نیتروژن فوری به صورت زیر است [3] :

(۴)



نرخ تولید NO در این مکانیزم مطابق معادله (۱۷) می‌باشد [3].

$$\frac{d[NO]}{dt} = f_c k_{prompt} [O_2]^\alpha [N_2] [fuel] \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (17)$$

در معادله فوق α مرتبه واکنش و f_c یک ضریب تصحیح وابسته به نسبت اکسید کننده به سوخت و نوع سوخت می‌باشد. همچنین $E = 72500 \text{ cal/g mol}$ و $k_{prompt} = 6.4 \times 10^6$ می‌باشدند. مقدار اکسید نیتروژن فوری بهشت به میزان کربن موجود در محفظه وابسته می‌باشد. این مکانیزم مخصوصاً در شرایط احتراقی دما پایین و یا احتراق مخلوط غنی سوخت اهمیت پیدا می‌کند که با کنترل این شرایط می‌توان تولید اکسیدهای نیتروژن را کاهش داد.

هر دو نوع اکسید نیتروژن (سوختی و حرارتی) در آلودگی هوا نقش دارند لذا ضرورت ایجاد می‌کند که با مدیریت صحیح و کنترل انتشار این گازها از کانون‌های عمدۀ تولید آنها مانع از آلیندگی و مسمومیت جوامع انسانی به این اکسیدهای خطرناک گردید [4]. از میان آلینده‌های ذکر شده اکسیدهای نیتروژن یا NO_x در دهه‌ی اخیر توجه زیادی را به خود جلب نموده و نگرانی‌های بسیاری را از جهت خطرات ناشی از انتشار این گاز در هوا موجب شده است. وضعیت هوای ایران نیز از نظر حضور این آلینده در شرایط خطرناکی قرار دارد. به اثرات زیست محیطی NO_x در شکل ۳ اشاره شده است:

در نزدیکی شرایط استوکیومتری و مخلوط غنی، علاوه بر واکنش‌های فوق واکنش دیگری هم اهمیت می‌یابد که توسط رابطه زیر بیان می‌شود:



نرخ ثابت واکنش‌ها به صورت زیر می‌باشد [3] :

$$k_1 = 1.8 \times 10^8 \exp(-38370/T) [\text{m}^3/\text{kmol-s}]$$

$$k_{-1} = 3.8 \times 10^7 \exp(-425/T) [\text{m}^3/\text{kmol-s}]$$

$$k_2 = 1.8 \times 10^4 T \exp(-4680/T) [\text{m}^3/\text{kmol-s}]$$

$$k_{-2} = 3.81 \times 10^3 T \exp(-20820/T) [\text{m}^3/\text{kmol-s}] \quad (4)$$

$$k_3 = 7.1 \times 10^7 \exp(-450/T) [\text{m}^3/\text{kmol-s}] \quad (5)$$

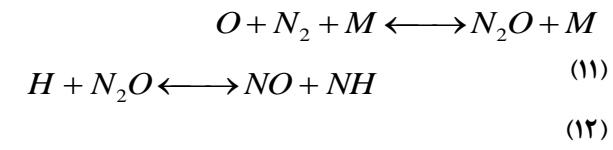
نرخ خالص تشکیل NO حاصل از واکنش‌های بالا به صورت معادله (۶) می‌باشد.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1 [O][N_2] + k_2 [N][O_2] \\ + k_3 [N][OH] - k_{-1} [NO][N] - k_{-2} [NO][O] - k_{-3} [NO][H] \quad (6)$$

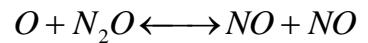
۴- مکانیزم واسط

مکانیزم تولید N_2O واسط در شرایط مخلوط رقیق (نسبت هم ارزی کمتر از ۰.۸) و دمای پایین اهمیت پیدا می‌کند. سه مرحله این مکانیزم عبارتند از:

(۱۰)



(۱۲)



این مکانیزم در فرایندهای کنترل NO که شامل احتراق پیش مخلوط رقیق هستند، مثل فرایند احتراق در توربین گازی، بسیار مهم می‌باشد.

-۲- اکسیدهای نیتروژن سوختی (ناکس سوختی) که در روند احتراق سوخت از ساختار شیمیایی سوخت جدا می‌شود. این مدل که در احتراق هیدروکربن‌ها اهمیت دارد، اولین بار توسط فینیمور^۲ ارائه شد. فینیمور نشان داد که در احتراق مقداری NO در ناحیه شعله پیش از تولید NO با مکانیزم حرارتی، به سرعت تولید می‌شود و به همین دلیل این مکانیزم را مکانیزم فوری نامید. در این مکانیزم، اکسید نیتروژن از اکسیداسیون مستقیم نیتروژن

²Fenimore

پارامترهایی که تغییرات آن‌ها در نتایج تست‌های این مرجع منظور شده، عبارت‌اند از: تغییر وضعیت دمپرهای هوای اولیه از ۲۵ درصد بازشدنگی تا بازشدنگی کامل، تغییر میزان هوای ورودی به مشعل‌ها، استارت سوخت مازوت در یک مرحله از تست‌ها و نهایتاً بالاتر کردن میزان درصد اکسیژن در دو طرف کوره با تنظیم هوای ورودی را شامل می‌شود[10]. در تحقیق دیگر که توسط موسوی و ترشیزی و همکاران انجام شد، سوختگی نازل‌های گاز مشعل نیروگاه شازند درحال مازوت موربدرسی قرار گرفت. طبق این مطالعه، مشکلات موجود در مشعل‌ها که تکنسین‌های نیروگاه را مجبور می‌کند در دوره‌های حدود ۶ ماهه به تعمیر یا تعویض مشعل‌ها اقدام نمایند، مربوط به طراحی اولیه و یا راه اندازی آن‌ها می‌باشد. در این پژوهش از سهم نظر ارزیابی آماری تخریب، بررسی روند تخریب نازل‌ها و تغییرات ریز ساختاری آن‌ها و نهایتاً با بررسی دمای نازل‌ها در طول کارکرد با گاز طبیعی به این نتیجه رسیدند که می‌باشد تغییراتی در شکل نازل‌ها ایجاد شود. شایان ذکر است که در این مطالعه هیچ گونه بهینه سازی بر روی شکل نازل‌ها انجام نشده است. بنابراین می‌توان با انجام فرآیند بهینه‌سازی با تابع هدف دمای سطح نازل‌ها، شکل آن‌ها را بهبود بخشدید[11]. در پژوهشی دیگر، سه راهی کاشانی به بررسی تاثیرات تنظیم هوای اضافی بر راندمان بویلر در نیروگاه‌های کشور پرداخته است. در مرحله مذکوره نیروگاه شهید منتظری اصفهان، نیروگاه زرگان و بندرعباس را موربدرسی قرار گرفته و تاثیرات میزان هوای اضافه بر تولید آلاینده‌ها و عملکرد بویلر تحلیل شده است. در این پژوهش مشاهده گردید که با تنظیم و تغییر مقدار هوای اضافه در احتراق نسبت به مقدار مشخص شده در مدارک طراحی، افزایش در راندمان بویلر مشاهده می‌گردد. نتیجه اینکه به مور زمان و با کارکرد نیروگاه، احتمالاً نقطه کارکرد بهینه نیروگاه از نقطه اشاره شده در مدارک طراحی فاصله می‌گیرد[12].

حبیب و همکاران در مطالعه‌ای تحت عنوان محاسباتی احتراق *oxyfuel* در به بررسی احتراق اکسیژن و هوای در دیگهای بخار پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد در صورت استفاده از اکسیژن به جای هوای درجه حرارت در احتراق *oxyfuel* کاهش می‌یابد و میزان مصرف سوخت و اکسیژن نسبت به سوخت احتراق هوای کاهش خواهد یافت.[13]

در سال ۱۳۹۲ اسماعیل‌زاده و دیگران به مدل سازی انتشار گازهای NO_x و SO_2 خروجی از دودکش نیروگاه گازی توسعه مشهد پرداختند. نیروگاه گازی توسعه به عنوان یکی از منابع انتشار گازهای آلاینده در شمال غربی مشهد قرار دارد. این نیروگاه در مجاورت چندین منبع خطی، نقطه ای و سطحی قرار گرفته است و به این جهت تعیین سهم دقیق انتشار گازهای آلاینده این نیروگاه امکان پذیر نیست. بنابراین در این مطالعه از مدل سازی برای تخمین میزان پراکنش آلاینده‌های خروجی از این نیروگاه استفاده



شکل (۳): اثرات زیست محیطی ناکس

خالصی دوست و اسماعیلی در سال ۱۳۸۸ به بررسی اثرات زیست محیطی NO_x و SO_x ناشی از احتراق در نیروگاه‌های حرارتی سوخت فسیلی ایران پرداختند. در این مقاله به تشریح آلودگی‌های NO_x و SO_x ناشی از احتراق نیروگاه‌های حرارتی کشور مانند: منتظر قائم (بخاری، گازی)، بعثت، اسلام آباد، شهید منتظری، شهری سلیمی، تبریز و پرداخته و با مقایسه آنها با استانداردهای جهانی میزان انحراف آنها مشخص شده و همچنین راهکارهای مناسب جهت کاهش این اثرات مخرب ارائه گردیده است. هم اکنون در کشور ۳۴ نیروگاه حرارتی با مصرف حدود روزانه ۵۸۸۷ میلیون لیتر مازوت و ۱۲۵۴۱ میلیون متر مکعب گاز طبیعی و ۱۱۵۱ میلیون لیتر گازوئیل انرژی برق سرانه ۱۳۶۵ کیلووات ساعت را تولید می‌نمایند. بر اثر مصرف سوخت‌های مذکور و نتایج اندازه گیری‌ها و محاسبات انجام شده روزانه حدود ۱۵۰۰ تن دی اکسید گوگرد، ۴۰۴، تن اکسیدهای ازت، ۶۰، تن ذرات معلق، ۸/۷، تن هیدروکربن و ۱۹ تن منوکسید کربن و مقدار بسیار زیادی دی اکسید کربن در هوای مناطق مختلف کشور از طریق دودکش نیروگاه‌ها به هوای آزاد تخلیه می‌گردد[5].

از جمله پژوهش‌های انجام شده در حوزه شبیه‌سازی عددی مشعل‌ها در داخل کشور، مطالعه موسوی و همکاران تحت عنوان شبیه‌سازی مشعل‌های نیروگاه شازند به روش عددی و بررسی اثر هوای اولیه بر شکل و محل شعله [6]، مطالعه آقای رمضان تحت عنوان بررسی عددی اثرات چرخش هوای خروجی مشعل‌ها در بویلهای نیروگاه توسعه مشهد [7]، مطالعه آقای علیپور با عنوان شبیه‌سازی عددی مشعل‌های نیروگاه شازند ارک جهت بهبود فرآیند احتراق در بویلر [8]، علی فرداد با عناوین بررسی تجزیی اثر پایدارکننده شعله و بررسی اثر تغییر دی سوخت بر شعله و می‌باشد[9]. در دیگر پژوهش صورت گرفته در حوزه مشعل نیروگاه شازند، شاهمنصوری به بهینه‌سازی هوای احتراق در بویلر نیروگاه شازند پرداخته است. در پژوهش مذکور سعی شده با کنترل هوای سوخت، احتراق را از نظر تولید اجزائی چون CO_2 ، O ، CO ، NO_x بهینه نماید. مهم‌ترین

قراردادی برای احداث دو واحد بخاری ۳۱۵ مگاواتی دیگر بین وزارت نیرو و شرکت تکنوبروم اکسپورت بسته شد و هم‌اکنون ظرفیت اسمی نیروگاه ۱۸۹۰ مگاوات می‌باشد و از نظر تولید برق یکی از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های بخاری کشور محسوب خواهد شد وجود بویلر در نیروگاه حرارتی باعث متصاعد شدن آلاینده‌های گازی محیط زیست در منطقه اطراف می‌گردد که برای انسانها، مزارع و موجودات زنده بسیار خطرناک می‌باشد. سازمان محیط زیست جهت کنترل این آلاینده‌ها حدود مجاز را تعریف نموده است که طبق جدول شماره ۱ می‌باشد.

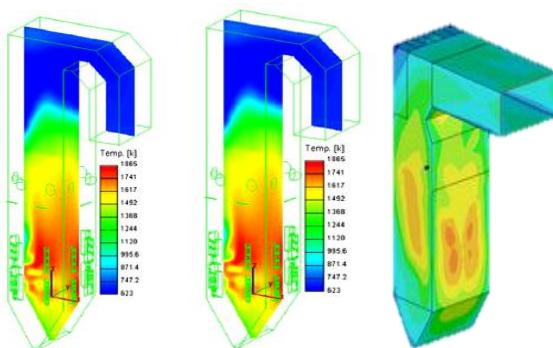
جدول (۱): مجاز انتشار آلاینده‌های هوای نیروگاهها

توضیحات	حد مجاز انتشار		واحد اندازه گیری	آلاینده	منبع آلاینده
	درجه ۲	درجه ۱			
با سوخت گاز	۳۰۰	۱۵۰	mg/Nm ³	NO _x	دوکش‌ها و دستگاه انتقال حرارت
با سوخت مازوت	۴۰۰	۲۰۰	mg/Nm ³		
با سوخت گازوئیل	۲۵۰	۲۰۰	mg/Nm ³		
با سوخت گاز	۲۰۰	۱۰۰	mg/Nm ³	CO	

۶- مشخصات مشعل نیروگاه رامین:

- * هر یک از بویلهای نیروگاه رامین دارای ۱۶ عدد مشعل می‌باشد.
- * هشت عدد مشعل بر روی دیواره جلویی در دو طبقه قرار دارد.
- * هشت عدد مشعل بر روی دیواره عقبی در دو طبقه قرار دارد.
- * این مشعل‌ها با گاز طبیعی و سوخت مایع (مازوت) کار می‌کنند.
- * مشعل‌های پایینی در ارتفاع 9050 mm و مشعل‌های بالایی در ارتفاع 1230 mm قرار دارند.
- * فاصله افقی بین مشعلهای مرکزی 3128 mm و فاصله بین مشعلهای مرکزی و انتهایی 3082 mm است.
- * فاصله بین مشعل‌های انتهایی و دیواره جانبی بویلر 3514 mm می‌باشد.

که شکل هندسی این مشعل‌ها به صورت شکل شماره ۹ و ۱۰ و ۱۱ می‌باشد [18].



شکل (۹): توزیع دما داخل محفظه احتراق و توزیع دمای دیواره

گردید. با توجه به غلظت مورد اندازه گیری آلاینده‌های NO_x و CO₂ از نیروگاه، غلظت این آلاینده‌ها در مقایسه با استانداردهای هوای پاک سازمان حفاظت محیط زیست بسیار کمتر است [14].

کاشیوابارا و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثرات ذرات تولید شده توسط NO_x در مoshهای صحراوی، و تاثیرات آن بر فرایندهای روانی پرداختند. بر اساس این مطالعه NO_x منجر به تولید ذرات اکسیژن فعال در سلول بدن می‌شود که تاثیرات مخربی بر روی فعالیت‌های ذهنی و روانی سلول موجودات زنده می‌گذارد [15].

سیو و همکاران در سال ۲۰۱۷ مطالعه‌ای بر روی اثرات ایزوفورمهای NO_x بر روی توسعه بیماری‌های آورتیک شکمی انجام دادند. این مطالعه نشان داد که NO_x نقش مهمی در تشیدی بیماری‌های شکمی ایفا می‌کند و می‌تواند منجر به بروز بیماری‌های خطرناکی برای انسان شود. بر اساس این نتایج و با در نظر گرفتن اثرات NO_x، بایستی رویکرد جدیدی جهت درمان اینگونه بیماری‌ها اتخاذ شود [16].

فاکتور انتشار آلاینده NO_x در نیروگاه‌های توربین گازی در حالت گازسوز با وجود راندمان کمتر نسبت به نیروگاه‌های بخار و سیکل ترکیبی، کمتر است و دلیل آن تجهیز نیروگاه‌های توربین گازی به مشعل‌های DLN^(۱) است. در این وضعیت مجهر بودن نیروگاه‌ها به سیستم‌های کاهش این آلاینده بسیار موثرتر از نقش افزایش راندمان آن هاست. ۲۶.۷ درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و ۷۱.۴ درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های توربین گازی کشور مجهر به مشعل DLN در حالت گازسوز است. هیچ یک از نیروگاه‌های بخار هنگام مصرف سوخت گاز دارای سیستم کاهش آلاینده NO_x نیست. [17]

۵- محل انجام تحقیق :

در سال ۱۳۵۳ قراردادی بین شرکت سهامی تولید و انتقال نیروی برق ایران (توانیر) و شرکت تکنوبروم اکسپورت اتحاد جماهیر شوروی سابق، در مورد احداث نیروگاهی در نزدیکی شهر اهواز، شامل دو واحد بخاری، هر یک به قدرت ۳۰۵ مگاوات منعقد گردید. سپس در سال ۱۳۵۴ ۱ قرارداد دیگری برای اضافه کردن دو واحد مشابه فی‌مابین توانیر و شرکت تکنوبروم اکسپورت به امضاء رسید و بدین ترتیب مراحل تهیه و مقدمات اجرایی کارها برای احداث چهار واحد ۳۰۵ مگاواتی آغاز گردید. عملیات تجهیز کارگاه و کارهای ساختمانی از سال ۱۳۵۴ در زمینی به مساحت بیش از ۱/۵ میلیون مترمربع در شمال شرقی اهواز شروع گردید. محل نیروگاه در کیلومتر ۲۵ جاده اهواز - مسجدسلیمان در نزدیکی روستای ویس و همچنین در نزدیکی رودخانه کارون می‌باشد. بعد از جنگ تحمیلی



شکل (۱۴): نازل‌های مرکزی مشعل و اجزاء آن



شماره (۱۰): مشعل‌های دیواره جلویی بویلر



شکل (۱۵): نازل‌های محیطی مشعل از قسمت بیرون مشعل



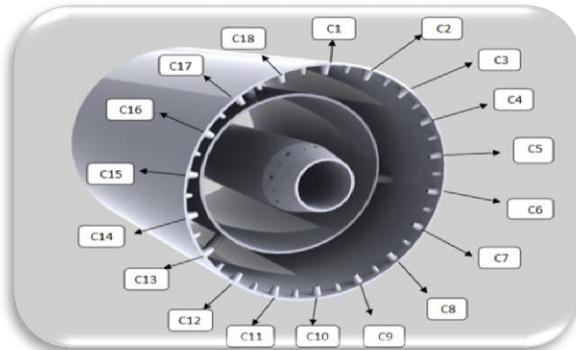
شکل (۱۱): مشعل‌های دیواره عقبی بویلر

۷-آلاینده‌های حاصل از سوخت‌های مصرفی نیروگاهها
به طور کلی سوخت مصرفی نیروگاه‌ها از انواع مختلف از قبیل گاز طبیعی، زغال سنگ، مازوت، و گازوئیل باشد. سوخت گاز طبیعی به دلایل سهولت در انتقال، پاکی احتراق و مشکلات کمتر در مورد بازمانده احتراق، اصولاً هم برای دیگر بخار و هم برای محیط زیست بسیار کم ضررتر است. سیستم سوخت رسانی هم بسیار ساده است. در میان سوخت‌های فسیلی زغال سنگ حاوی بیشترین مقدار ترکیبات گوگردی می‌باشد. سالیانه ۱۵۰ میلیون تن از ترکیبات گوگردی در اثر فعالیتهای بشری به جو وارد می‌شود که ۹۰٪ این مقدار از احتراق سوخت‌های فسیلی می‌باشد. جدول ۲ و ۳ مقدار انتشار آلاینده‌ها از جمله اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای ازت، اکسیدهای کربن، هیدروکربنها و ذرات معلق را نشان می‌دهد.

جدول (۲) : میزان آلاینده‌های سوخت‌های نیروگاه (بر حسب تن)
هر ۱۰۰۰ بشکه معادل نفت خام

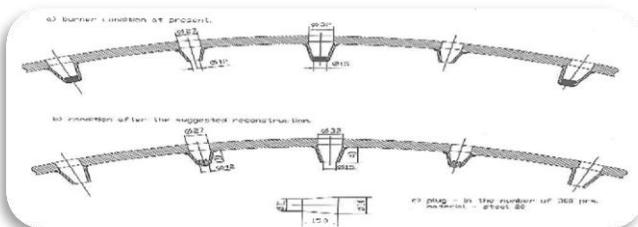
NOX	SO2	CO2	SO3	CH	SPM	آلاینده سوخت
۰/۸	۲/۴	۴۱۱	۰	۰	۰/۲	گازوئیل
۰/۷	۶/۷	۴۲۴	۰/۱	۰/۱	۰/۱	نفت کوره
۰/۵	۰	۳۳۸/۷۵	۰	۰	۰	گاز طبیعی

جدول (۳) : میزان انتشار گازهای آلاینده‌ها از نیروگاه‌های کشور ایران در سال ۱۳۹۲ بر حسب (تن)



شکل (۱۲): نازل‌های محیطی مشعل‌ها که با حرف C نشان داده می‌شوند.

کanal محیطی هر مشعل دارای ۳۶ نازل به صورت یک در میان و ۱۸ نازل به قطر mm ۱۵ و ۱۸ نازل به قطر mm ۱۲ می‌باشد شکل شماره ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶.



شکل (۱۳): نازل‌های محیطی مشعل بویلر

که در آن φ متغیر وابسته می‌باشد که می‌تواند جرم، مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی، نرخ اضمحلال انرژی جنبشی، آنتالپی و کسر جرمی اجزاء باشد $\Gamma\varphi$. ضریب دیفیوژن و $S\varphi$ ترم مربوط به چشمی یا چاه حرارتی می‌باشد.

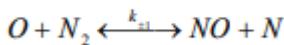
مدل سازی اکسید نیتروژن

برای تخمین NO نیاز به حل معادله انتقال کسر جرمی آن (YNO) می‌باشد. این معادله به صورت پس پردازش و پس از تعیین میدان اصلی جریان و گونه‌های اصلی، حل می‌شود. معادله انتقال جرم برای NO به صورت زیر نوشته می‌شود که شامل عبارت‌های جابجایی نفوذی، تولید و مصرف NO است.

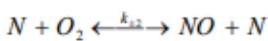
(19)

$$\rho \frac{\partial Y_{NO}}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} \right) + S_{NO}$$

که در آن جمله چشمی SNO با توجه به سه مکانیزم تشکیل : NO حرارتی، NO سریع و NO سوختی، محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه در احتراق سوختهای مایع مقدار NO سریع در مقایسه با دو نوع دیگر قابل صرفنظر کردن می‌باشد در این تحقیق NO حرارتی و سوختی محاسبه می‌شوند NO حرارتی که به وسیله اکسیداسیون نیتروژن موجود در هوا در دماهای بالا تشکیل می‌شود، با استفاده از مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته بیان می‌گردد [19].



(20)



(21)



(22)

که $K \pm$ ثوابت رو به جلو و رو به عقب واکنش است. با فرض اینکه نرخ مصرف اتم های آزاد نیتروژن مساوی نرخ تولید آن است، غلظت NO از رابطه زیر ۲۳ به دست می‌آید

(23)

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{+1}[O][N_2] \left(\frac{1 - \frac{k_{-1}k_{-2}}{k_{+1}} \frac{[NO]^2}{[N_2][k_{+2}[O_2]}}}{1 + \frac{k_{-1}}{k_{+2}[O_2] + k_{+3}[OH]}} \right)$$

مقدار ثابت های نرخ واکنش‌های تعادلی فوق از مرجع به دست می‌آید [۱۰]. با توجه به اینکه نرخ تشکیل NO بسیار کمتر از نرخ اکسیداسیون هیدروکربن اصلی است، بیشتر NO حرارتی بعد از کامل شدن احتراق تشکیل می‌شود. در رابطه فوق غلظتهای N2 و

۸- مشخصات شکل هندسی محفظه احتراق

محفظه احتراق استوانه‌ای شکلی با هشت راه مماسی ورودی هوا به شعاع 2 mm و یک ورودی محوری سوخت به قطر ۱۶ mm در نظر گرفته شده است. الکترود مرکزی به قطر ۰.۵ mm و از جنس فوالد و قطر کلی محفظه ۴۰ mm و طول آن ۲۶۰ mm در نظر گرفته شده است. هوای ورودی با سرعت بین ۷ m/s تا ۳/۵ m/s بر ثانیه از هشت مجرای وارد محفظه می‌گردد.

۹- مشخصات کوره

کوره مورد نظر از نوع تک مسیره بوده که انتقال حرارت در آن به صورت تشعشعی انجام می‌شود. ورودی سوخت شامل ۶ نازل سوخت می‌باشد که سوخت را به صورت ساعی و محوری وارد کوره تزریق می‌کنند. روی هر لوله سوخت سه عدد دهانه ورودی سوخت قرار گرفته که یکی به صورت ساعی و دو عدد دیگر به صورت ترکیبی (ساعی و محوری) سوخت را وارد محفظه احتراق می‌کنند. هوا از سه مسیر شامل هوای مرکزی احتراق، هوای اولیه و هوای ثانویه وارد کوره می‌شود. هوای مرکزی پس از عبور از یک تثبیت کننده شعله با زاویه پره ۴۵° وارد کوره می‌شود. ورودی های سوخت اطراف تثبیت کننده شعله قرار گرفته اند.

۱۰- معادلات حاکم

نقطه شروع محاسبات در جریانهای بدون احتراق حل معادلات ناویراستوکس می‌باشد. برای جریان های همراه با انتقال حرارت معادله انرژی اضافه می‌شود. تکمیل کننده این دسته از معادلات بقاء، معادله حالت و مشخصات خواص سیال می‌باشند. برای گازهای ایدهآل و واقعی این معادلات به دینامیک سیال و ترمودینامیک جریان مرتبط هستند. با اضافه نمودن شرایط مرزی و اولیه به این معادلات، تحلیل یک جریان غیراحتراقی به طور کامل قابل بررسی می‌باشد. جریانهای احتراقی شامل آزاد شدن انرژی حرارتی در اثر تبدیل گونه‌های شیمیایی به یکدیگر می‌باشند. این خصوصیات جریان های احتراقی نیاز به مدلسازی فرایند احتراق و اضافه نمودن آنها به معادلات ناویراستوکس را دارند. فرمول کلی معادلات جریان دائم و پایا در یک مختصات استوانه‌ای به صورت زیر است.

(18)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X} (\rho U \varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho V \varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho W \varphi) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial X} \right) + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}) &+ S_\varphi \end{aligned}$$

$$S_{NO} = (R_1 - R_2) \frac{M_{NO}}{RT} \quad (31)$$

از محاسبات احتراق تعیین می شود و غلظت رادیکال [O] و [OH] از روابط زیر بدست می آید(20).

(24)

$$[O] = 36.64T^{1/2}[O_2]^{1/2} \exp\left(\frac{-27123}{T}\right) \quad (24)$$

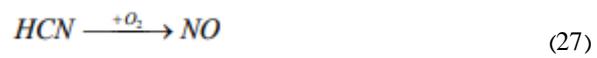
$$[OH] = 212.9T^{-0.57} \exp\left(\frac{-4595}{T}\right)[O]^{1/2}[H_2O]^{1/2} \quad (25)$$

بنابراین بخشی از جمله چشمۀ معادله (2) از مکانیزم زلدوویچ به صورت زیر محاسبه می شود.

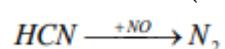
(26)

$$S_{NO,th} = M_{NO} \frac{d[NO]}{dt}$$

که در آن M_{NO} جرم مولکولی گاز NO است. تولید NO از سوخت، پدیده پیچیده تری است و شدیداً به استوکیومتری شعله، مشخصه های احتراق موضعی و غلظت اولیه ترکیبات نیتروژن دار وابسته است. در اثر گرم شدن و تبخیر قطرات سوخت رادیکالهای حاوی نیتروژن مانند HCN ، NH و NCN ، در اثر تجزیه حرارتی ترکیبات حاوی نیتروژن حاصل می شود که می توانند به NOx تبدیل شوند. با توجه به اینکه سیانید نیتروژن (HCN) رادیکال غالب است مکانیزم پذیرفته شده برای تشکیل NO سوختی، شامل تشکیل HCN از نیتروژن سوخت و سپس انجام دو واکنش اکسیداسیون آن به NO و ترکیب آن با بخشی از NO و $N2$ تشکیل می باشد [۲۰].



(28)



نرخهای واکنش دو رابطه فوق بر اساس اندازه گیری های دی سوت به صورت زیر بیان می شود [۱۲].

$$R_2 = A_2 X_{HCN} X_{NO} \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) \quad (29)$$

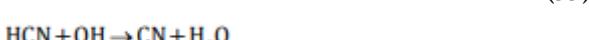
$$R_1 = A_1 X_{HCN} X_{O_2}^a \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) \quad (30)$$

که در روابط فوق X کسر مولی، a با می باشد $A1=3/5 \times 1012$ ، $s/1$ 10 $E1=60000$ cal/mol و $E2=67000$ cal/mol، $A2=3 \times 10^3$ ، $Et=67000$ cal/mol توجه به اینکه NO در واکنش (۱۳)، تولید و در واکنش (۸) مصرف می شود جمله چشمۀ حاصل از NO سوختی برای معادله (۳۱) از رابطه زیر بدست می آید.

که در آن، k_f نرخ انجام واکنش در رابطه (۲۳) است.

۱۱- اکسید نیتروژن انگیخته
در سال ۱۹۷۱، فنیمور نشان داد که واکنشهای غیر از واکنشهای حرارتی در شعله در پیدایش اکسید نیتروژن مؤثرند و باعث تولید مقداری اکسید نیتروژن در منطقه شعله میشوند. این مکانیزم تشکیل اکسید نیتروژن معمولاً خیلی سریع شکل میگیرد و با واکنشهای احتراق سوخت درگیری بیشتری نسبت به مکانیزم حرارتی دارد. تولید اکسید نیتروژن از طریق این مکانیزم، که معمولاً در مخلوطهای غنی وجود دارد، منجر به تشکیل اکسید نیتروژن در منطقه شعله میشود [۲۱].

این مکانیزم اکسید نیتروژن انگیخته نامیده میشود. در این مکانیزم اکسید نیتروژن در اثر برخورد بین مولکولهای نیتروژن و رادیکالهای هیدروکربن تولید میشود. تشکیل اکسید نیتروژن از طریق این مکانیزم به تعداد اتمهای کربن در واحد حجم وابسته است. با افزایش نسبت همارزی، غلظت رادیکالهای آزاد کربن در ناحیه اول شعله افزایش یافته و در نتیجه میزان تولید اکسید نیتروژن از طریق این مکانیزم افزایش مییابد. این پدیده در شعله های سوخت غنی نمایانتر است [۲۲]. مطالعات بعدی وی بیانگر این مطلب هستند که اکسید نیتروژن انگیخته در شعله های غی هیدروکربنی مشاهده نشده است. عامل این مکانیزم توسط فنیمور رادیکالهای هیدروکربنی معرفی شد [۲۳]. با توجه به شکلگیری اکسید نیتروژن انگیخته در منطقه شعله و همزمان بودن هر دو فرآیند (احتراق و تشکیل اکسید نیتروژن) واکنشهای این مکانیزم بهصورت روابط (۷) تا (۱۰) معرفی شده است [۲۴]:



نرخ میزان اکسید نیتروژن انگیخته بهوسطه این مکانیزم از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است:

(34)

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_f [CH][N_2] \exp\left(\frac{-E_f}{RT}\right)$$

که در آن، k_f نرخ انجام واکنش در رابطه (۲۳) است.

جریان در داخل کوره‌ها و محفظه‌های احتراق از نوع جریانهای چرخشی و مغشوش می‌باشد. معادلات حاکم بر این جریانها، معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، آشفتگی، انرژی، نرخ تولید و از بین رفتن گونه‌های شیمیایی و تابش بوده که با حل همزمان این معادلات برای هندسه بویلر با شرایط مرزی مشخص، مشخصات جریان احتراقی در محفظه احتراق محاسبه می‌گردد. در احتراق سوخت مایع علاوه بر معادلات فوق، معادلات لاغرانزی مسیر ذرات سوخت و معادلات انرژی برای محاسبه نرخ تبخیر سوخت نیز حل می‌شوند. معادله دیفرانسیل کلی بقا در فاز گازی برای متغیر ϕ بصورت زیر می‌باشد.^(۱۹)

(35)

$$\begin{aligned} (\rho u_i + \overline{\rho' u'_i}) \frac{\partial \phi}{\partial x_i} &= - \frac{\partial}{\partial x_j} \\ \left(\rho \overline{u'_j \phi'_j} + u_j \overline{\rho' \phi'} + \overline{\rho' u'_j \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \end{aligned}$$

که محاسبه ترمehای نوسانی $u'_j \phi'$ وظیفه مدلhای اغتشاشی می‌باشد^(۲). محاسبه سرعت ذرات سوخت و یافتن مسیر آنها نقش مهمی بر مسیر ذرات و در نتیجه دما و نرخ تبخیر آنها دارد. رفتار ذرات به وسیله موقعیت اولیه، جرم، دما، سرعتاولیه و سپس با بالانس نیروهای خارجی از قبیل نیروهای واردہ از طرف سیال، محاسبه می‌گردد. معادلات اندازه‌حرکت ذرات مایع با استفاده از موازنی نیروهای خارجی وارد بر قطره بدست می‌آیند^(۱۵) که در راستای فرضی X بصورت زیر می‌باشد:

(36)

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(\hat{u} - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x$$

۱۵- مدل‌های تشکیل آلاینده‌ها

استیلن در اثر واکنشهای مختلف شیمیائی در هنگام احتراق هیدروکربن‌ها تشکیل می‌گردد و باعث تولید حلقه‌های بنزن اشتعال شده می‌شود. حلقه‌های بنزن با یکدیگر ترکیب می‌شوند و تولید حلقه‌های بزرگتری می‌کنند که هیدروکربن‌های حلقوی و چند حلقه‌ای PAH نامیده می‌شوند. رشد هیدروکربن‌های حلقوی و چند حلقه‌ای سبب تشکیل ذرات جامد در فاز گاز می‌شود که به آنها، هسته دوده گفته می‌شود. با توجه به پیچیدگی فرایندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر پدیده از مدلhای نیمه تجربی ارائه شده برای محاسبه دوده در فرایند احتراق استفاده شده است. در این تحقیق از مدل دومرحله ای تسنر^(۸) (جهت مدلسازی نرخ هسته زایی و تشکیل دوده استفاده شده است. فرایند تشکیل اکسیدهای نیتروژن نیز مانند دوده بسیار پیچیده می‌باشد. به طور عمده سه مکانیزم برای تولید NOx در احتراق مطرح می‌شود^(۹)

۱۲- حل عددی

معادلات حاکم شامل بقای جرم، مومنت، اجزاء شیمیایی، آلاینده‌گی و انرژی براساس روش حجم محدود حل شده است. به منظور دستیابی به حل مستقل از شبکه‌بندی، تعداد سلول‌های محاسباتی در سه حالت بررسی شده است. نتایج حاصل از ۳۲۰۰ شبکه مربعی سازمان یافته رضایتبخش بوده است و تغییر محسوسی نسبت به حالت‌های قبل نشان نمی‌دهد. معیار همگرایی برای معادله انرژی خطای نسبی و برای سایر معادلات بقا تعريف شده است

۱۳- هندسه و شرایط مرزی

ابعاد شبکه محاسباتی بر دقت نتایج محاسبات عددی و زمان انجام خیلی موثر است. گرچه با افزایش تعداد گره در هنگام شبکه بندی میدان محاسباتی، دقت نتایج افزایش می‌یابد اما به زمان و حافظه بیشتری نیاز می‌باشد. در این پژوهش ناحیه ورودی و نزدیک دیوارها که تغییرات خواص جریان بیشتر است، شبکه ظرفیتر انتخاب شده است. در شکل شماره ۱ شبکه محاسباتی محفظه احتراق نشان داده شده است. استقلال از مش بودن شبکه حل مورد بررسی قرار گرفته و تعداد ۲۲۶۴۱۶ برای میدان حل در نظر گرفته شده است. برای گسته سازی عبارت‌های جابجایی معادلات حاکم از طرح بالادستی مرتبه اول و برای تصحیح میدان فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است.

برای همگرایی از ضرایب تخفیف ۷/۰ برای میدان جریان و برای گونه‌های شیمیایی از جمله آلاینده‌ها، ۹/۰ استفاده شده است همچنین معیار همگرایی معادلات 10×10 -فرض شده است. روش حل عددی بر پایه حجم محدود و شرایط دائمی است. به علت تقارن محوری نیمی از محفظه احتراق حل شده است. دبی حجمی گاز ورودی به مشعل 4413 m s^{-1} و دبی جرمی هوای $3 \text{ ورودی kg s}^{-1}$ ۳۶۴/۸ باشد.

دمای ورودی سوخت و هوا 300°C درجه کلوین و فشار ورودی یک اتمسفریک در نظر گرفته شده است. دمای سطح دیواره محل نصب مشعل ۶۶۷ کلوین، دیواره روپروی مشعل ۸۰۰ کلوین، دمای سطح داخل بولیر ۷۲۶ کلوین، دیواره های کناری ۷۲۶ کلوین و دمای سطح داخل بولیر دیواره سقف ۶۶۷ کلوین، با توجه به مقادیر تجربی فرض شده است. برای مدل سازی توربولانس از روش RNG k-e مدل استفاده شده است.

۱۴- مدل ریاضی و روش حل عددی

بالا لازم است که چهار معادله خطی و نه معادله غیرخطی به طور همزمان حل شوند.

معادلات حاصل از موازنۀ اتمی:

(39)

$$\begin{aligned}x &= n_1 + n_2 + n_{13} \\y + 2b &= 2n_3 + n_4 + n_5 + 2n_6 + 4n_{13} \\2a + b &= 2n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_8 + 2n_{10} + 2n_{11} + n_{12} \\2a \times 3.76 &= 2n_7 + n_8 + n_9 + n_{10}\end{aligned}$$

این معادلات را برای جزء مولی به شکل زیر میتوان نوشت:

(40)

$$\begin{aligned}y\chi_1 + y\chi_2 + y\chi_{13} - 2x\chi_3 \\- x\chi_4 - x\chi_5 - 2x\chi_6 - 4x\chi_{13} = 0 \\2(a-x)\chi_1 + (2a-x)\chi_2 - x\chi_3 - x\chi_4 - x\chi_8 - 2x\chi_{10} - 2x\chi_{11} - x\chi_{12} + 2a\chi_{13} = 0 \\7.52a\chi_1 + 7.52a\chi_2 - 2x\chi_7 - x\chi_8 - x\chi_9 - x\chi_{10} + 7.52a\chi_{13} = 0 \\\sum_{i=1}^{13} \chi_i = 1.0\end{aligned}$$

همان طور که بیان شد جهت حل معادله احتراق نیاز به ۹ معادله در کنار معادلات موازنۀ شیمیایی است که میتوان از ۹ واکنش تعادلی تجزیه دیاکسید کربن، تجزیه آب، تشکیل رادیکال هیدروکسیل، تجزیه هیدروژن، تجزیه اکسیژن، تشکیل متان، تجزیه نیتروژن، تشکیل اکسید نیتریک و تشکیل دیاکسید نیتریک برای این منظور استفاده کرد. لذا با ۱۳ معادله ۱۳ مجھول جزء مولی محصولات احتراق به دست میآید.

(41)

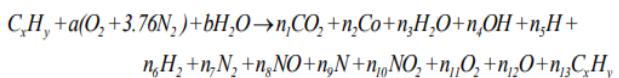


که عبارتند از مکانیزم گرمایی زلدوبیج مکانیزم سوختی و مکانیزم فوری مکانیزم گرمایی مهمترین مکانیزمی است که تاکنون شناخته شده است و وابستگی شدیدی به دما دارد. به همین دلیل با توجه به افزایش دمای شعله با افزایش تعداد کربنهای موجود در زنجیره سوخت، فرایند تشکیل NOx از اهمیت بیشتری برخوردار است. NOx سوختی، هنگامیکه حجم نیتروژن در سوخت بیش از ۰/۱ وزن سوخت باشد، به وسیله اکسیداسیون ترکیبات نیتروژن دار سوخت در ناحیه شعله تشکیل می‌شود و مقدار آن بسیار قابل توجه است. با توجه به درصد بالای نیتروژن موجود در سوخت مازوت (حدود ۰/۲۶ درصد) مقادیر این آلاینده نیز قابل توجه است. در مکانیزم NOx فوری که در سال ۱۹۷۱ توسط فنیمور مطرح گردیده است دراثر برخورد بین مولکول‌های نیتروژن و رادیکال‌های هیدروکربن اکسیدهای نیتروژن تولید می‌گردد. تشکیل این اکسید اساساً به غلظت رادیکال در ناحیه اول شعله وابسته است و سهم آن در حالت احتراق با اکسیژن اضافی ناچیز است. در مخلوط‌های غنی از سوخت با وجود دمای پایین، سهم NOx فوری ممکن است به ۲۵ درصد کل NOx برسد.

۱۶-تحلیل احتراق و مدلسازی انواع - NOx

با در نظر گرفتن احتراق فشار ثابت در محفظه احتراق و این که دما، فشار، مقدار آب و هوای خشک موجود در هوای ورودی به محفظه احتراق معلوم‌نمود، محصولات احتراق را در دو حالت میتوان تعیین کرد. یکی معلوم بودن دمای خروجی محفظه احتراق (دمای بالای سیکل) و دیگری معلوم بودن مقدار سوخت پاشیده شده در محفظه احتراق یا به عبارت دیگر در ثاب. چون معمولاً دمای بالای سیکل در سیکل‌های واقعی معلوم است، در تحلیل اولیه سیکل از این فرض استفاده شده Qin است. با در نظر گرفتن این که احتراق کامل باشد و محصولات احتراق به صورت زیر باشند خواهیم داشت:

(37)



که b نسبت جرمی آب به سوخت است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$b = \frac{kg_{water}}{kg_{fuel}} \times \frac{M_{fuel}}{M_{water}} \quad (38)$$

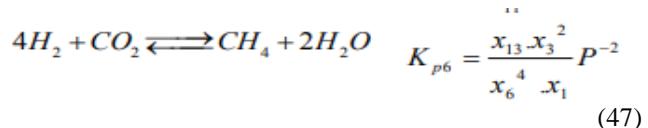
برای یافتن این ۱۳ مجھول نیاز به ۳۸ معادله داریم. ۴ معادله از موازنۀ تعداد مولکولهای اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن و کربن حاصل میگرددند و تعداد ۹ معادله مستقل دیگر نیز اساساً از معادلات غیرخطی تعادل حاصل میشوند که به طور توانم با چهار معادله قبلی حل میشوند. بنابراین برای حل یک سیستم CHON با محصولات

که توسط تنی چند از محققین مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در مجموع ضرایب شدت به گونه زیر استخراج شده‌اند
(53)

$$\begin{aligned} k_{N1f} &= 1.8 \times 10^{11} \exp(-38370/T(K)) & m^3 / kmol \cdot s \\ k_{N1r} &= 3.8 \times 10^{10} \exp(-425/T(K)) & m^3 / kmol \cdot s \\ k_{N2f} &= 1.8 \times 10^7 \exp(-4680/T(K)) & m^3 / kmol \cdot s \\ k_{N2r} &= 3.8 \times 10^6 \exp(-20820/T(K)) & m^3 / kmol \cdot s \\ k_{N3f} &= 7.1 \times 10^{10} \exp(-450/T(K)) & m^3 / kmol \cdot s \\ k_{N3r} &= 1.7 \times 10^{11} \exp(-24560/T(K)) & m^3 / kmol \cdot s \end{aligned}$$

از مشخصه‌های بارز این مکانیزم (حرارتی) میتوان به موارد زیر اشاره کرد ۳: واکنشهای این مکانیزم در مقایسه با واکنشهای فرآیند احتراق سوخت از سرعت خیلی پایینتری برخودارند بنابراین NO حرارتی عموماً در منطقه جلو شعله یا گازهای سوخته در نظر گرفته می‌شود ۳. به علت انرژی اکتیواسیون نسبتاً بالای واکنش اولی (kJ ۳۱۹۰۵۰) این مکانیزم شدیداً به دما (به صورت نمایی) وابسته است و به همین دلیل این مکانیزم را حرارتی مینامند ۳. واکنش سوم این مکانیزم فقط در شرایط احتراق با سوخت غنی مهم می‌باشد ۳. این مکانیزم در محدوده نسبت اکیوالنس ۰/۸ تا ۱/۰۵ منبع عده تولید NO به شمار می‌رسد. در واکنشهای اول تا سوم رادیکالهای O و OH که نقش بسیار مهمی در احتراق سوخت ایفا می‌کنند، شرکت دارند. بنابراین در حالت کلی واکنشهای مکانیزم حرارتی با واکنشهای احتراق سوخت کوپل می‌باشند اما چون نرخ کلی تشکیل NO توسط مکانیزم حرارتی در مقایسه با واکنشهای احتراق سوخت خیلی کند پیش می‌رود، اغلب فرض بر این است که واکنشهای این مکانیزم از فرآیند احتراق سوخت جدا است. با این جایگزینی، نرخ تشکیل NO با فرض شرایط تعادل برای دما و غلظتها O₂, OH و N₂O غلظت اتمهای نیتروژن با تقریب حالت پایدار از معادلات اول و دوم) محاسبه می‌گردد.

این دسته از مکانیزم‌های تشکیل NOx که خود به سه دسته تقسیم می‌شوند معمولاً خیلی سریع شکل می‌گیرند و با واکنشهای احتراق سوخت درگیری بیشتری نسبت به مکانیزم حرارتی دارند و با احتراق سوخت به طور همزمان انجام می‌شوند. به همین دلیل این مکانیزم‌ها باعث تشکیل NO در منطق شعله می‌گردند NOx از این مکانیزم‌ها به NO موجود معروف است [۹]. الف - مکانیزم فمینور: اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که زمانی که پروفیلهای غلظت NO به محل جبهه یک شعله آرام پیش آمیز می‌رسند غلظت NO به سمت صفر میل نمی‌کند، بلکه به یک مقدار معینی میرسد. بنابراین نرخ تشکیل NO در سیستمهای احتراق با سوختهای هیدروکربنی، معمولاً پیش از نرخ تشکیل آن توسط اکسیداسیون مولکولهای نیتروژن توسط مکانیزم حرارتی می‌باشد. به خصوص در شعله‌های سوخت غنی این پدیده نمایانتر است. آقای فمینور (۱۹۷۱) اثبات کرد که واکنشهایی غیر از مکانیزم حرارتی در شعله در پیدایش NO مؤثرند و باعث تولید مقداری NO در



لذا با ۱۳ معادله ۱۳ مجهول جزء مولی محصولات احتراق به دست می‌آیند.

مکانیزم زلدوج پیشرفت (حرارتی) نیتریک اکسید NO یکی از مهمترین اکسیدهای نیتروژن تولید شده در منابع احتراق می‌باشد. عموماً عقیده بر این است که NO از نیتروژن موجود در اتمسفر تشکیل می‌شود. در احتراق سوختهای تمیز (سوختهایی که فاقد ترکیبات نیتروژنی هستند)، اکسید نیتروژن اتمسفری-NO (توسط مکانیزم حرارتی یکی از عمده‌ترین منبع نشر و صدور NOx می‌باشد. آقای زلدوج در سال ۱۹۴۶ دو واکنش زنجیره‌ای زیر را جهت تشکیل NO در واکنشهای احتراقی پیشنهاد داد که به ۱ مکانیزم زلدوج (حرارتی) مشهور است)



در سال ۱۹۷۰ آقای لاوی دو و همکارانش واکنش سوم زیر را به این دو واکنش افروندند و مکانیزم را زلدوج پیشرفت (حرارتی) نامیدند.



هم این واکنش در تشکیل NO بایستی ناچیز باشد، زیرا گونه‌های در حال واکنش هر دو به صورت رادیکال می‌باشند که در نتیجه فقط مقادیر بسیار کمی از آنها می‌تواند وجود داشته باشد. مسیر سینتیکی تشکیل NO حمله مولکولی از اکسیژن به یک مولکول نیتروژن نمی‌باشد بلکه از نظر مکانیزم شیمیایی، حمله اتمهای اکسیژن حاصله از تجزیه O₂ یا از حمله اتم هیدروژن به O₂ در دماهای بالا، به مولکولهای نیتروژن می‌باشد. جهت تعیین ضرایب شدت این واکنشها روش‌های اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد

$EF = \text{فاکتور انتشار}$
 $ER = \text{درصد کلی کاهش انتشار}$

برای محاسبه فاکتور انتشار روش های مختلفی نظیر پایش مداوم، روش موازنه مواد، مدل سازی و چندین روش دیگر وجود دارد. روش پایش مداوم بهترین روش است و به طور کامل میزان و نحوه انتشار را مشخص می کند اما هزینه اجرایی بالایی دارد. بدین منظور از روش موازنه مواد استفاده می شود که ضریب اطمینان بالا و هزینه کمتری نسبت به پایش مداوم دارد ولی در همه موارد کاربرد ندارد. برای حل این مشکلات متخصصین به دنبال روش هایی هستند که با هزینه کمتر و منطقی، اطمینان لازم را جهت محاسبه فاکتور انتشار فراهم آورند. استفاده از روش های مدل سازی و نرم افزارهای نگارش یافته در این زمینه جهت محاسبه فاکتور انتشار و استفاده بلند مدت از آن کاربرد بسیار زیادی دارد. در این روش دارای هزینه اجرایی پایین و قابلیت اطمینان بالایی می باشد و در صنایع و مناطقی که امکان اندازه گیری وجود ندارد کاربرد بسیار زیادی دارد.^[۱۳]

در این مطالعه نتایج حاصل از اندازه گیری گازهای حاصل از احتراق NO_x و CO ارائه شده وبا توجه به روابط ترمودینامیکی حاکم بر گازها و موازنجه جرمی محصولات احتراق، غلظت این گازها در محیط نرم افزار اکسل پردازش شده و خروجی نرم افزار شامل غلظت جرمی گازهای حاصل از احتراق، میزان انتشار و فاکتور انتشار هر یک از این گازها تعیین شده است. در شکل (۳) مراحل تعیین و محاسبه فاکتور انتشار گازهای خروجی از نیروگاه ارائه شده است.



شکل (۳): محاسبه فاکتور انتشار

۱۸- نتایج آلودگی حاصل از احتراق

موارد زیر به عنوان شرایط پایه در نظر گرفته شده و میزان آلیندها محاسبه شده است.

- ۱- میزان دبی خروجی گازهای خارج شده از دودکش $10405 \text{ m}^3/\text{min}$
- ۲- میزان فلوی مصرفی گاز $77000 \text{ m}^3/\text{hr}$
- ۳- فلوی هوای ورودی به محفظه احتراق $56000 \text{ m}^3/\text{hr}$
- ۴- میزات تولید برق 300 MW

منطقه شعله میگردد. وی این NO را Prompt (نامید [۹]). مطالعات بعدی بیانگر این مطلب بودند که NO موجود فقط در شعلهای هیدروکربنی شکل میگیرد. با توجه به شکل گیری NO موجود در منطقه شعله و همزمان بودن هر دو فرآیند (احتراق و تشکیل) NO واکنشهای این مکانیزم در زیر آورده شده است. در ابتدا رادیکالهای هیدروکربن با نیتروژن مولکولی وارد واکنش شده و ترکیبات آمین یا سیانور را میدهدند در ادامه ترکیبات آمینها به ترکیبات میانی تبدیل شده که نهایتاً منجر به تولید NO میشود. صرف نظر از فرآیندهای تشکیل رادیکالهای CH جهت شروع این مکانیزم، مکانیزم فمینور را میتوان به صورت زیر بیان کرد.



$$(55)$$



$$(57)$$



$$(59)$$



$$(59)$$



$$(59)$$

دادههای موجود بیانگر این مطلب هستند که مکانیزم فوق به علت شکل گیری در منطقه جلوی شعله در شرایط فوق تعادلی برای غلظت رادیکالهای O و OH اتفاق میافتد. غلظتهای فوق تعادل این رادیکالها به نسبت زیادتر از غلظتهای تعادلی آنها می باشد و میتوان آنها را با تقریب با فرض سه واکنش سریع زیر برای OH و واکنش سوختن CO در حال تعادل محاسبه نمود.

۱۷- فاکتور انتشار

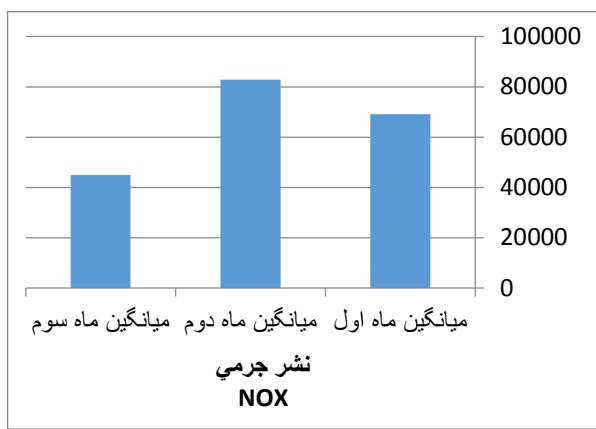
فاکتور انتشار و برآورد مقدار آن برای مدیریت کیفیت هوا یک ابزار کلیدی محسوب شده و تخمين میزان نشر برای توسعه راهکارهای کنترل انتشار بسیار مهم می باشد. این فاکتور معمولاً براساس جرم آلینده تولیدی بخش بر محصول یا ماده اولیه (واحد وزن، حجم، فاصله، انرژی تولیدی یا زمان انتشار آلینده) بیان می شود. در نیروگاه ها فاکتور انتشار بر حسب میزان جرم گازهای حاصل از احتراق بر حسب انرژی الکتریکی تولیدی یا انرژی حرارتی مورد استفاده بیان می شود.

به طور کلی معادله تخمين انتشار به شرح زیر است^(۱۹)

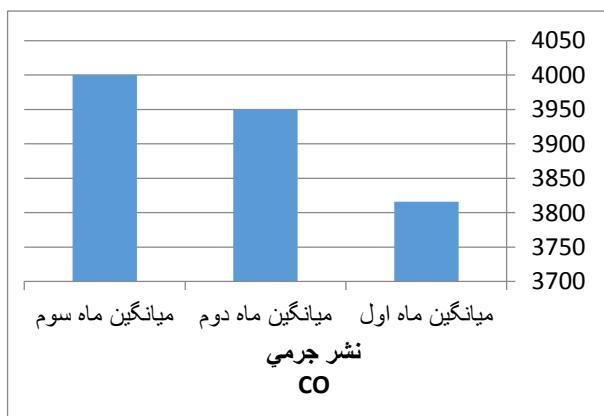
$$E = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) :$$

E = مقدار جرم آلینده

A = میزان تولید واحد صنعتی



نمودار(۳): نشر جرمی ناکس در حالت پایه بر حسب gr/s



نمودار(۴): نشر جرمی CO در حالت پایه بر حسب gr/s

-۲۱- محاسبه میزان فاکتور انتشار آلاینده‌های خروجی از دود کش در حالت پایه بر حسب grkw/hr : جدول شماره ۵ و نمودار ۵

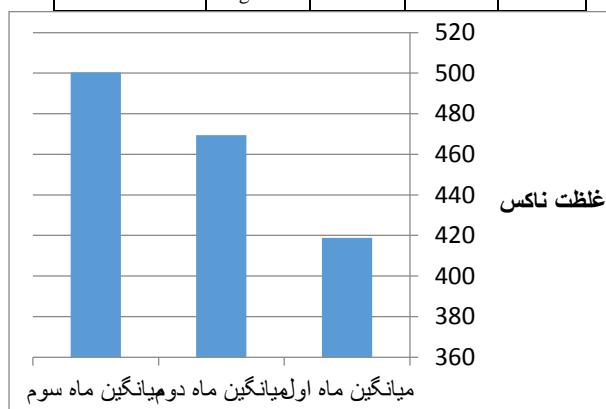
جدول(۵): فاکتور انتشار بر حسب grkw/hr

فاکتور انتشار	No _x	gr/kwhr	۲/۶
	CO	gr/kwhr	۲/۰

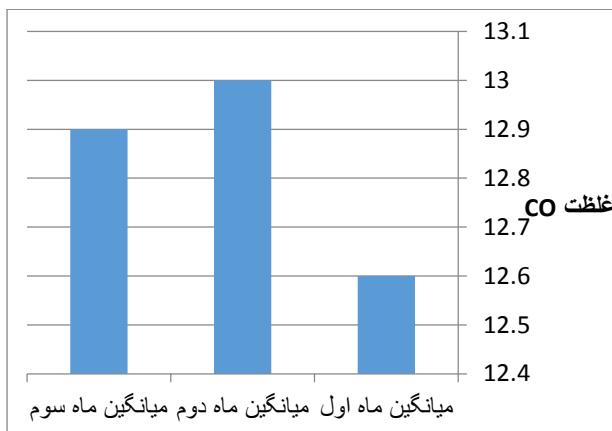
۱۹- میانگین غلظت جرمی آلاینده‌ها در شرایط بهره برداری پایه در سه ماهه تابستان بر حسب mg/Nm³ مطابق جدول شماره ۳ و نمودار شماره ۱ و ۲

جدول(۳): غلظت آلاینده‌ها در شرایط پایه

غلظت جرمی گازهای حاصل از احتراق	واحد اندازه گیری	میانگین ماه اول	میانگین ماه دوم	میانگین ماه سوم
No _x	mg/Nm ³	۴۱۸/۸	۴۶۹/۵	۵۰/۰/۳
CO	mg/Nm ³	۱۲/۶	۱۳/۰	۱۲/۹



نمودار ۱ - آلاینده NOX در حالت پایه

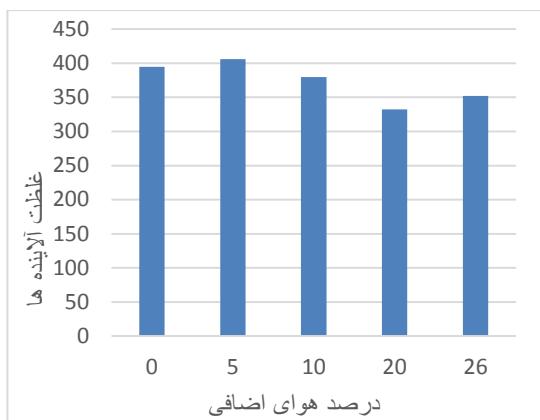
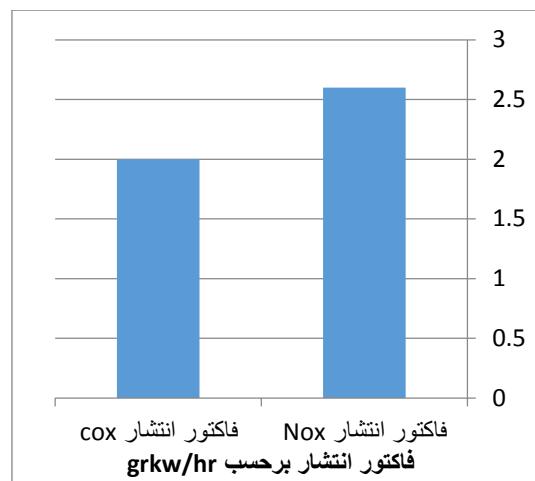
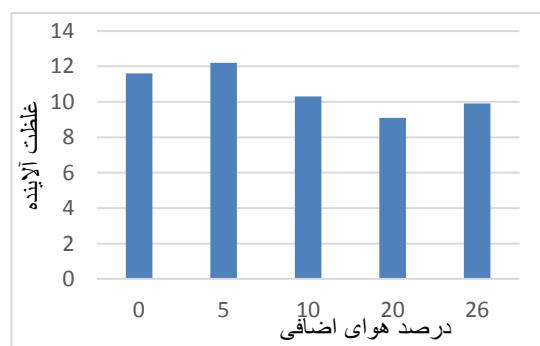


نمودار (۲): آلاینده CO در حالت پایه

-۲۰- تبدیل غلظت جرمی به نشر جرمی آلاینده‌ها در شرایط بهره برداری پایه در سه ماهه تابستان بر حسب gr/s : مطابق جدول شماره ۴ و نمودار شماره ۳ و ۴

جدول (۴): میزان نشر جرمی در حالت پایه

غلظت جرمی گازهای حاصل از احتراق	واحد اندازه گیری	میانگین ماه اول	میانگین ماه دوم	میانگین ماه سوم
Nox	gr/s	۶۹۱۰۲	۷۲۸۱۰	۴۵۰۶
CO	gr/s	۳۸۱۶	۳۹۵۰	۴۰۱۰

نمودار(۶): میزان NO_x در شرایط اعمال هوای اضافی به کورهنمودار(۵): فاکتور انتشار CO و NO_x بر حسبنمودار(۶): میزان CO در شرایط اعمال هوای اضافی به کوره

با مشاهده و مقایسه میزان آلاینده ها در حالت دمش هوای اضافی با حالت پایه مشخص شد که با افزایش هوای اضافی به کوره تا حدود ۲۰٪ کاهش آلاینده ها را خواهیم داشت . لازم به ذکر است که افزایش هوای اضافی به بویلر علارقم کاهش آلاینده ها خود باعث کاهش راندمان حرارتی بویلر می شود زیرا بخشی از انرژی حرارت بویلر صرف گرم کردن همین هوای اضافی اعمال شده می شود. در شرایط پایه با مصرف $77\text{m}^3/\text{h}$ گاز طبیعی در نیروگاه می توان 30MW برق تولید کرد ولی با افزایش هوای اضافی به کوره کاهش راندمان حرارتی و در نهایت کاهش تولید برق را خواهیم داشت مطابق محاسبات جدول شماره ۸ :

۲۲- بررسی میزان آلاینده ها در شرایط اعمال هوای اضافی به بویلر

این اندازه گیری در سه مرحله انجام شد و با شرایط پایه مقایسه گردید . بدین شکل که در فاصله زمانی ۱۲ ساعته دمش هوای اضافی اعمال شد و میزان آلاینده ها اندازه گیری شد. جدول شماره ۷ و نمودار ۶ و ۷

جدول (۶): حالت پایه در زمان اندازه گیری هوای اضافی

نوع آلاینده	واحد اندازه گیری	غلظت اندازه گیری
NO_x	mg/Nm^3	۳۹۵
CO	mg/Nm^3	۱۱/۶

جدول (۷): میزان آلاینده ها در شرایط اعمال هوای اضافی به کوره

میزان آلاینده ها در شرایط اعمال هوای اضافی	نوع آلاینده	نوع آلاینده	۱٪ غلظت آلاینده	۵٪ دمدم هوای آنرا	۱۰٪ دمدم هوای آنرا	۲۰٪ دمدم هوای آنرا	۴۰٪ دمدم هوای آنرا	۷۰٪ دمدم هوای آنرا	۱۰۰٪ دمدم هوای آنرا	واحد اندازه گیری
میزان آلاینده ها در شرایط اعمال هوای اضافی	NO_x	۴۰۶	۴۰۶	۳۷۹/۶	۱۶	۳۳۲	۲۵۲	mg/ N^3		
میزان آلاینده ها در شرایط اعمال هوای اضافی	CO	۱۲/۲	۱۰/۳	۹/۱	۹/۹	mg/ N^3				

جدول (۸)

$77000\text{m}^3/\text{h}$	= دبی مصرفی گاز برای ۳۰۰ مگاوات برق
8200 kCal/m^3	= ارزشی حرارتی گاز طبیعی
$1 \text{ Cal} = 4.18 \text{ J}$	
$77000 \times 8200 \times 4.18 \text{ J}$	$= 727.11 \text{ MW}$
$3600 \text{ s} \times 1000$	
$728.110 \times (0.34)$	(راندمان نیروگاه)
270 MW	تولید

نمودار (۸) : CO در حالت اعمال اغتشاش

نتایج :

- ۱- سوخت گاز در مقایسه با سوخت های دیگر نیروگاه آلودگی NO_x و CO کمتری دارد.
- ۲- فاکتور انتشار ناکس در حالت گاز سوز بیشتر از منوکسید کربن است.
- ۳- در شرایط اعمال هوای اضافی به کوره تا ۲۰٪ غلظت آلاینده ها کاهش می یابد.
- ۴- با دمش هوای اضافی به کوره تا ۲۶٪ افزایش غلظت آلاینده ها را خواهیم داشت.
- ۵- دمش هوای اضافی به کوره با عث کاهش راندمان حرارتی بویلر شده و به میزان ۲۰ MW تولید یک واحد نیروگاهی را کاهش می دهد.
- ۶- عدم توازن سوخت و هوا در کوره در شرایط اغتشاش زیاد باعث افزایش بیش از حد آلاینده ها می شود.
- ۷- موارد زیر در حفظ کنترل و کاهش آلاینده ها بسیار موثر می باشند.
 - ۱- کنترل سطح اکسیژن
 - ۲- تنظیم نمودن مسیرهای سوخت به مشعل
 - ۳- میزان جریان در مسیرهای سوخت
 - ۴- اندازه گیری و کنترل جریان هوای اولیه و هوای دمنده ها
 - ۵- کنترل دقیق نسبت هوا به سوخت
 - ۶- کنترل نوسان مکانیکی مشعلها و دمپرهای

۷- کیفیت سوخت مصرفی

همانگونه که ذکر شد با توجه به وجود سیستم‌های گوناگون و پیشرفت‌های صورت گرفته در تجهیزات کنترل آلودگی، یکی از مهمترین و تأثیرگذارترین عوامل جهت نصب این سیستم‌ها، قیمت تمام شده این گونه تجهیزات است که نهایتاً در قیمت برق تولیدی تأثیرگذار خواهد بود. از جمله مواردی که به کاهش هزینه تمام شده کمک می نماید میتوان به موارد زیر اشاره نمود:

- بررسی وضعیت بهره برداری
- بررسی قوانین انتشار آلودگی
- سهمیه بندی بودجه
- مدلسازی سه بعدی
- تدوین و اجرای برنامه زمان بندی
- ارزیابی هزینه احداث
- ارزیابی هزینه و بهره برداری و نگهداری
- بررسی روش های جایگزین
- گزارش مهندسی

لذا دمش هوای اضافی به کوره باعث کاهش راندمان حرارتی بویلر شده و میزان تولید برق به اندازه حدود ۲۰ مگاوات کم شده است.

۲۳- بررسی میزان اغتشاش در بویلر و میزان آلاینده های ناشی از آن

ابتدا در حالت پایه در لحظه قبل از اغتشاش میزان آلاینده اندازه گیری گردید و نتایج آن با اعمال دو حالت اغتشاش زیاد و کم مقایسه گردید. اعمال اغتشاش از طریق بر هم زدن توازن هوای ورودی و خروجی و کم و زیاد کردن سوخت گاز طبیعی می باشد.

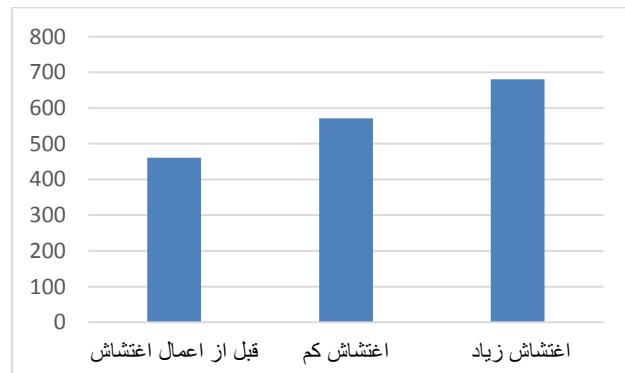
جدول شماره ۹ و ۱۰ و نمودار شماره ۷ و ۸

جدول (۹) : میزان آلاینده در حالت پایه قبل از اعمال اغتشاش

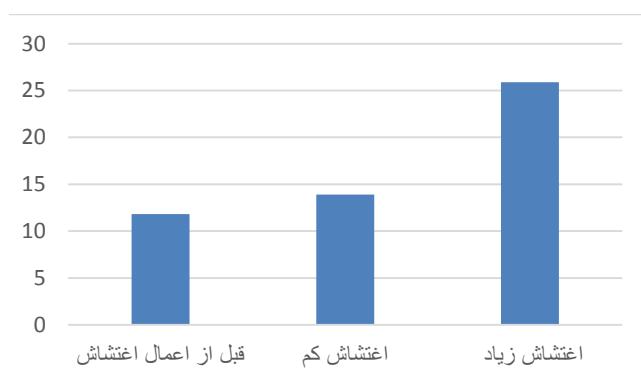
میزان آلاینده در حالت پایه	نوع آلاینده در حالت پایه	واحد	واحد
NOx		mg/Nm ³	۴۶۰/۸
CO		mg/Nm ³	۱۱/۸

جدول (۱۰) : میزان آلاینده در حالت اعمال اغتشاش

اغتشاش کم	اغتشاش زیاد	اغتشاش کم	اغتشاش زیاد
NOx	mg/Nm ³	۵۹۰/۹	۶۸۰/۷
CO	mg/Nm ³	۱۳/۹	۲۵/۹



نمودار (۷) : CO در حالت اعمال اغتشاش



- [8] اسماعیل زاده محمد، بذر افشار ادريس، نصر آبادی مهناز. مدل سازی انتشار گازهای SO_2 و NOX خروجی از دودکش نیروگاه گازی توس مشهد. سلامت و محیط زیست. ۱۳۹۲؛ ۶(۱) ۷۷-۹۰:
- [9] رمضان، مهدی و محسن کهرم، ۱۳۹۲، بررسی عددی اثرات چرخش هوای خروجی مشعلها در بویلهای نیروگاه توس مشهد، پانزدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها (سیالات)، بندرعباس، انجمن فیزیک ایران، دانشگاه هرمزگان.
- [9] فرداد، عباسعلی؛ محمد صدیقی؛ سیدمهدی حسینی بگدادآبادی و سهیلا خوشنویسان، ۱۳۸۸، بررسی تجربی اثر تغییر دبی سوخت و هوای مشعل گازسوز روی پارامترهای احتراقی در نقاط مختلف محفظه احتراق، سومین کنفرانس احتراق ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- [11] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم؛ علی رفیعی و احسان الله سعادتی، ۱۳۸۴، شبیه سازی مشعل های نیروگاه شازند به روش عددی و بررسی اثر هوای اولیه بر شکل و محل شعله، بیستمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو.
- [12] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم؛ علی رفیعی و احسان الله سعادتی، ۱۳۸۴، شبیه سازی مشعل های نیروگاه شازند به روش عددی و بررسی اثر هوای اولیه بر شکل و محل شعله، بیستمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو.
- [13] M.A. Habib, R. Ben-Mansour, H.M. Badr, S.F. Ahmed, A.F. Ghoniem, Computational fluid dynamic simulation of oxyfuel combustion in gas-fired water tube boilers, *Computers & Fluids*, Volume 56, (2012) 152-165..
- [14] Turns SR, An introduction to combustion: Concept and applications, McGraw Hill, 2000.
- [6] nyukhienwong and sainheryanto, "the study of active stack effect to enhance natural ventilation using wind tunnel and computational fluid dynamics (cfd) simulations,"energy and building , volume 36,issue 7,july 2004, pages 668 – 678.ا
- [15] Poinsot, T., Ducruix, S., Large Eddy Simulation and Experimental Study of Flashback and Blow off in a Lean Partially Premixed Swirled Burner, *Journal of Turbulence*, Vol. 37, pp. 1-21, 2014
- [8] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم؛ علی رفیعی و احسان الله سعادتی، ۱۳۸۴، شبیه سازی مشعل های نیروگاه شازند به روش عددی و بررسی اثر هوای اولیه بر شکل و محل شعله، بیستمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو.
- [16] M.A. Habib, R. Ben-Mansour, H.M. Badr, S.F. Ahmed, A.F. Ghoniem, Computational fluid dynamic simulation of oxyfuel combustion in gas-fired water tube boilers, *Computers & Fluids*, Volume 56, (2012) 152-165..
- [17] Kashiwabara, Yoshiaki, et al. "Immunohistochemical localization of Nox in mouse

با توجه به موارد مطرح شده فوق، نیروگاه های بخاری براساس شاخص آلودگی نوع سوخت مصرفی و همچنین قدمت واحدهای نیروگاهی، سهم بیشتری را در کل آلاینده ها به خود اختصاص داده اند. با توجه به نوع سوخت مصرفی و قدرت عملی نیروگاه مورد مطالعه میزان انتشار آلاینده های دی اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن به ازای هر یک مگاوات تولید برق متفاوت است. یکی از منابع اصلی تولید آلاینده ها، نوع سوخت مصرفی نیروگاه هاست انتخاب انواع سوخت برای نیروگاهها به پارامترهایی از قبیل میزان هزینه هر یک از انواع سوخت، موقعیت جغرافیایی نیروگاه، قابلیت دسترسی میزان، آلودگی های محیطی هر کدام از سوخت ها و حتی سیاست های میان مدت و بلندمدت حاکم بر بخش انرژی بستگی دارد. یکی از سیاست ها در خصوص مصرف سوخت نیروگاه ها در ارتباط با کاهش آلاینده ها، استفاده حداکثر از گاز طبیعی می باشد.

منابع :

- [1] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم؛ علی رفیعی و احسان الله سعادتی، ۱۳۸۴، شبیه سازی مشعل های نیروگاه شازند به روش عددی و بررسی اثر هوای اولیه بر شکل و محل شعله، بیستمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو.
- [2] سلیمانی، علی، بررسی مکانیزم های تولید NO_x ، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی، ۱۳۹۳
- [3] M.A. Habib, R. Ben-Mansour, H.M. Badr, S.F. Ahmed, A.F. Ghoniem, Computational fluid dynamic simulation of oxyfuel combustion in gas-fired water tube boilers, *Computers & Fluids*, Volume 56, (2012) 152-165.
- [4] جلیلیان، صمد، مولا، سید علی، تاثیر آلودگی هوا ناشی از اکسیدهای نیتروژن برسلامتی انسان،
- [5] خالصی دوست، عبدالله و بابک نور اسماعیلی، بررسی اثرات زیست محیطی SO_x و NO_x ناشی از احتراق در نیروگاه های حرارتی سوخت فسیلی ایران، اولین کنفرانس ملی صنعت نیروگاههای حرارتی، تهران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۸
- [6] موسوی ترشیزی، سیدابراهیم؛ علی رفیعی و احسان الله سعادتی، ۱۳۸۴، شبیه سازی مشعل های نیروگاه شازند به روش عددی و بررسی اثر هوای اولیه بر شکل و محل شعله، بیستمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو.
- [7] سلیمانی، علی، بررسی مکانیزم های تولید NO_x ، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی، ۱۳۹۳
- [8] جلیلیان، صمد، مولا، سید علی، تاثیر آلودگی هوا ناشی از اکسیدهای نیتروژن برسلامتی انسان،

circumvallate papillae". *Tissue and Cell.*: 558-550:(2015).

[18] Siu, Kin Lung, et al. "NOX isoforms in the development of abdominal aortic aneurysm". *-Redox biology*. 125-118: (2017).

[19] فرداد عباسی؛ محمد صدیقی؛ سیدمهدي حسینی بعدادآبادی و سهیلا خوشنویسان، ۱۳۸۸، بررسی تجربی اثر تغییر دمی سوخت و هوای مشعل گازسوز روی پارامتر های احتراقی در نقاط مختلف محفظه احتراق، سومین کنفرانس احتراق ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[20] آرشیو فنی نیروگاه رامین اهواز

[21] رمضان، مهدی و محسن کهرم، ۱۳۹۲، بررسی عددی اثرات چرخش هوای خروجی مشعلها در بویلهای نیروگاه توکمشهد، پانزدهمین کنفرانس دینامیک شاره ها (سیالات)، بندرعباس، انجمن فیزیک ایران، دانشگاه هرمزگان.

[22] Petersson, P., Bai, X. S., Nauret, A., Olofsson, J., Brackman, C., Seyfried, H., Zetterberg, J., Li, Z. S., Richter, M., Dreizler, Linne, M., Alden, M., Large Eddy Simulation and Experiments of Stratified Lean Premixed Methane Air Turbulent Flames, Proceeding of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 1467-1475, 2007.

[23] Yang, V., Effect of Swirl on Combustion Dynamics in a Lean Premixed Swirl Stabilized Combustor, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 1775-1782, 2014.

[24] Vervisch, L., Angelberger, Ch., Colin, O., and Domingo, P., Large Eddy Simulation of a Fuel Lean Premixed Turbulent Swirl Burner, Combustion and Flame, Vol. 155, pp. 247-266, 2014.