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

امین تاجدانی[1] ، 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 می‌باشدکه وظیفه آن تولید بخار برای به حرکت در آوردن توربین‌ها می‌باشد. جهت افزایش راندمان حرارتی در نیروگاه بایستی از هدرروی حرارت در محفظه احتراق بویلرها جلوگیری کرد و به صورت همزمان پارامترهای آلاینده محیط زیست مانند NO_X و CO کنترل گردد. عدم کنترل پارامترهای آلاینده محیط زیستی باعث افزایش مصرف سوخت، پارگی واتروالها وسوپرهیترها 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 آلاینده های CO و No_x را در اثر تغییر در شرایط بهره 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 ها ،کنترل دقیق نسبت هوا به سوخت کنترل ، نوسان مکانیکی مشعلها و دمپرها ، کیفیت سوخت مصرفی، میزان تولید آلاینده را تخمین زده و برنامه ریزی موثری برای کاهش تولید آلاینده های NO_X و CO داشته باشد .

کلمات کلیدی : بررسی عددی احتراق بویلر – آلاینده های 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 تاجدانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : اهواز – نیروگاه رامین اهواز

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]

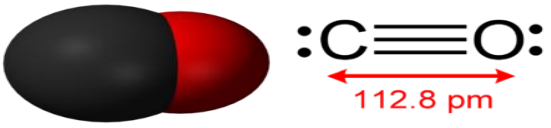
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

۱- مقدمه

مهم‌ترین منبع ایجاد آلاینده‌های هوا ازنظر 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 می توان از طریق تغییر در فرایند و نحوه احتراق یا نوع سوخت مصرفی ، میزان تولید و انتشار آلاینده‌ها به اتمسفر را کاهش داد . به‌عنوان مثال با استفاده از مشعل‌های ویژه ای می‌توان میزان تولید اکسیدهای نیتروژن را کاهش داد. همچنین با تغییرسوخت از انواع سوخت های مایع و جامد به 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 حداکثر غلظت مجاز نیز امکان پذیر است . نهایتا 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 تنفسی 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 برسد باعث مرگ خواهد شد شکل شماره ۱ .



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

۳- ناکس چیست Nox

ترکیبات NO_x اشاره به اکسیدهای نیتروژن دارد که شامل نیتروژن مونواکسید (NO) که بعنوان نیتریک اکسید نیز شناخته می شود و نیتروژن دی اکسید (NO_2) است. هم چنین می تواند شامل دیگر ترکیبات نیتروژن و اکسیژن که کمتر متداول‌اند مثل نیتروژن تترا اکسید (N_2O_4)و نیتروژن پنتااکسید (N_2O_5) نیز باشد. بر خلاف ازت (گازی بی طعم و بی بو و تشکیل دهنده ی ٪۷۸ از اتمسفر) که گازی بی ضرر است ، اکسیدهای ازت برای انسان خطرناک هستند. تعداد اکسیدهای ازت زیاد است ولی در میان آنها دو آلوده کننده ی 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 می شود. حرارت احتراق به حدی بالا است که مناسب ترکیب اکسیژن و ازت هوا می باشد. چنین حرارتی فقط در کوره های قوی و یا احتراق در فشار بالا تولید می شود. بدین جهت گاز NO به مقدار زیاد در سیلندرهای اتومبیل، نیروگاههای حرارتی و سایر اعمال تبدیل انرژی تولید می گردد. مقداری از گاز NO که نسبتاً بی خطر است در اتمسفر تبدیل به گاز دی اکسید نیتروژن (NO_2)می شود که گازی بسیار خطرناک است شکل شماره ۲ [2].



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

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

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

این سینتیک بر مبنای مکانیزم توسعه یافته زلدویچ[1] مبتنی بر اکسیداسیون مستقیم نیتروژن شکل می‌گیرد. این مدل در دماهای بالا (بیش از ۱۸۰۰K) اهمیت بسیاری پیدا می‌کند، زیرا انرژی مورد نیاز برای شکستن پیوند بین دو اتم نیتروژن بسیار بالاست (۹۴۵Kj/mol) و این انرژی تنها در دماهای بالا تأمین می‌شود. همچنین با هر ۹۰K افزایش دما در دمای بالاتر از ۱۸۰۰K، میزان اکسیدهای نیتروژن حرارتی تولیدی حدود دو برابر می‌شود و بیشترین درصد اکسیدهای نیتروژن تولید شده را شامل می‌شوند. مکانیزم توسعه یافته زلدویچ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$O + N_2 \xleftrightarrow{k_1} N + NO \qquad (۱)$$

$$N + O_2 \xleftrightarrow{k_2} O + NO \qquad (۲)$$

[1] Zeldovich

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

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

$$N + OH \xleftrightarrow{k_3} H + NO \quad (۳)$$

نرخ ثابت واکنش‌ها به‌صورت زیر می‌باشند [3] :

$k_1=1.8\times10^8\exp(-38370/T)[m^3/kmol\text{-}s]$

$k_{-1}=3.8\times107\exp(-425/T)$ [m3/kmol-s]

$k_2=1.8\times104T\exp(-4680/T)$[m3/kmol-s]

$k_{-2}=3.81\times103T\exp(-20820/T)$ [m3/kmol-s]

(۷)

$k_3= 7.1\times107\exp(-450/T)$ [m3/kmol-s]

نرخ خالص تشکیل NO حاصل از واکنش‌های بالا به‌صورت معادله (۹) می باشد.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] - k_{-1}[NO][N] - k_{-2}[NO][O] - k_{-3}[NO][H] \quad (۹)$$

۴- مکانیزم واسط

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

(۱۰)

$$O + N_2 + M \longleftrightarrow N_2O + M$$

(۱۱)

$$H + N_2O \longleftrightarrow NO + NH$$

(۱۲)

$$O + N_2O \longleftrightarrow NO + NO$$

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

۲- اکسیدهای نیتروژن سوختی (ناکس سوختی) که در روند احتراق سوخت از ساختار شیمیایی سوخت جدا می شود.

این مدل که در احتراق هیدروکربن ها اهمیت دارد، اولین بار توسط فنیمور[۲] ارائه شد.فمینور نشان داد که در احتراق مقداری NO در ناحیه شعله پیش از تولید NO با مکانیزم حرارتی، به سرعت تولید می شود و به همین دلیل این مکانیزم را مکانیزم فوری نامید. در این مکانیزم، اکسید نیتروژن از اکسیداسیون مستقیم نیتروژن تشکیل نمی‌شود، بلکه به صورت غیر مستقیم و از سیانید هیدروژن (HCN) تولید شده در محفظه احتراق شکل می‌گیرد. از آنجا که انرژی لازم برای شکستن پیوند بین اتم کربن و نیتروژن (۷۹۱Kj/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 به‌صورت زیر است [3] : (۴)

(۵)

$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N \quad (۱۳)$$

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \quad (۱۴)$$

$$HCN + OH \leftrightarrow CN + H_2O \quad (۱۵)$$

$$CN + O_2 \leftrightarrow NO + CO \quad (۱۶)$$

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

$$\frac{d[NO]}{dt} = f_c k_{prompt}[O_2]^{\alpha}[N_2][fuel]\exp(-\frac{E}{RT}) \quad (۱۷)$$

در معادله فوق α مرتبه واکنش و f_c یک ضریب تصحیح وابسته به نسبت اکسید کننده به سوخت و نوع سوخت می‌باشد. همچنین $E = 72500cal/gmol$ و $k_{prompt} = 6.4\times10^6$ می‌باشند. مقدار اکسید نیتروژن فوری به‌شدت 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 ایجاب می کند که با مدیریت صحیح وکنترل انتشار این گازها از کانون‌های عمده تولید آنها مانع از آلایندگی ومسمومیت جوامع انسانی به این اکسیدهای خطرناک گردید[4]. از میان آلاینده‌های 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 آلاینده در شرایط خطرناکی قرار دارد. به اثرات زیست محیطی NO_x در شکل ۳ اشاره شده است:

[2] Fenimore

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]



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 آلودگی های NO_x و SO_x ناشی از احتراق نیروگاهای حرارتی کشور مانند: منتظر قائم (بخاری، گازی) ، بعثت، اسلام آباد، شهید منتظری، شهید 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 می نمایند. بر اثر مصرف سوخت های مذکور و نتایج اندازه گیری‌ها و محاسبات انجام شده روزانه حدود ۱۵۰۰ تن دی اکسیدگوگرد،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 نیروگاه ها به هوای آزاد تخلیه می گردد[5].

ازجمله 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 بویلرهای نیروگاه توس مشهد [۷]، مطالعه آقای علیپور با عنوان شبیه‌سازی عددی مشعل‌های نیروگاه شازند اراک جهت بهبود فرآیند احتراق در بویلر]8[، علی فرداد با عناوین بررسی تجربی اثرپایدارکننده شعله و بررسی اثر تغییر دبی 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 هواو سوخت، احتراق را ازنظر تولید اجزائی چون CO_2 ، NO_x ، O ، CO بهینه نماید. مهم‌ترین پارامترهایی که تغییرات آن‌ها در نتایج تست‌هایاین مرجع منظور شده، عبارت‌اند از: تغییر وضعیت دمپرهای هوای اولیه از ۲۵ درصد بازشدگی تا بازشدگی کامل، تغییر میزان هوای ورودی به مشعل‌ها، استارت سوخت مازوت در یک مرحله از تست‌ها و نهایتاً بالانس کردن میزان درصد اکسیژن در دو طرف کوره با تنظیم هوای ورودی را شامل می شود[10]. درتحقیق دیگر که توسط موسوی و ترشیزی وهمکاران انجام شد، سوختگی نازل‌های گازِ مشعل نیروگاه شازند درحالت مازوت موردبررسی قرار گرفت. طبق این مطالعه، مشکلات موجود در مشعل‌ها که تکنسین‌های نیروگاه را مجبور می‌کند در دوره‌های حدود 6 ماهه به تعمیر یا تعویض مشعل‌ها اقدام نمایند، مربوط به طراحی اولیه و یا راه اندازی آن‌ها می‌باشد. دراین پژوهش از سهم نظر ارزیابی آماری تخریب، بررسی روند تخریب نازل‌ها و تغییرات ریز ساختاری آن‌ها و نهایتاً با بررسی دمای نازل‌ها درطول کارکرد با گاز طبیعی به این نتیجه رسیدند که می‌بایست تغییراتی در شکل نازلها ایجاد شود. شایان ذکر است که دراین 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 بخشید[11]. درپژوهشی دیگر، سهرابی کاشانی به بررسی تاثیرات تنظیم هوای اضافی بر راندمان بویلر درنیروگاه‌های کشور پرداخته است . درمرجع مذکورسه نیروگاه شهید منتظری اصفهان، نیروگاه زرگان و بندرعباس را موردبررسی قرارگرفته و تاثیرات میزان هوای اضافه بر تولید آلایندهها وعملکرد بویلر تحلیل شده است. دراین 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 مرور زمان و با کارکرد نیروگاه، احتمالاً نقطه کارکرد بهینه نیروگاه ازنقطه اشاره شده در مدارک طراحی فاصله می‌گیرد[12] .

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

در سال ۱۳۹۲ اسماعیل‌زاده و دیگران به مدل سازی انتشار گازهای NOx و SO2 خروجی از دودکش نیروگاه گازی توس مشهد پرداختند. نیروگاه گازی توس 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 دیگر 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 آلاینده های خروجی از این نیروگاه استفاده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

گردید. با توجه به غلظت مورد اندازه گیری آلاینده های NO_x و co2ناشی 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 موش‌های صحرایی، 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 توسعه‌ی بیماری‌های آئورتیک شکمی انجام دادند. این مطالعه نشان داد که NO_x نقش مهمی در تشدید 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 ا نتشار آلاینده NOx 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[1]است. در این وضعیت مجهز بودن نیروگاه‌ها به سیستم‌هایکاهش این آلاینده بسیار موثرتر از نقش افزایش راندمان آن‌هاست.۲۶.۷ درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و ۷۱.۴ درصد از ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های توربین گازی کشور مجهز به مشعل DLN در حالت گازسوز است. هیچ یک از نیروگاه‌های بخار هنگام مصرف سوخت گاز دارای سیستم کاهش آلاینده NOx نیست. [17]

۵- محل انجام تحقیق :

در سال ۱۳۵۳ قراردادی بین شرکت سهامی تولید و انتقال نیروی برق ایران (توانیر) و شرکت تکنوپروم 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 قرارداد دیگری برای اضافه کردن دو واحد مشابه فی‌مابین توانیر و شرکت تکنوپروم 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 ـ مسجدسلیمان در نزدیکی روستای ویس و همچنین در نزدیکی رودخانه کارون می‌باشد. بعد از جنگ تحمیلی قراردادی برای احداث دو واحد بخاری ۳۱۵ مگاواتی دیگر بین وزارت نیرو و شرکت تکنوپروم اکسپورت بسته شد و هم‌اکنون ظرفیت اسمی نیروگاه ۱۸۹۰ مگاوات می‌باشد و ازنظر 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 می‌گرددکه 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.

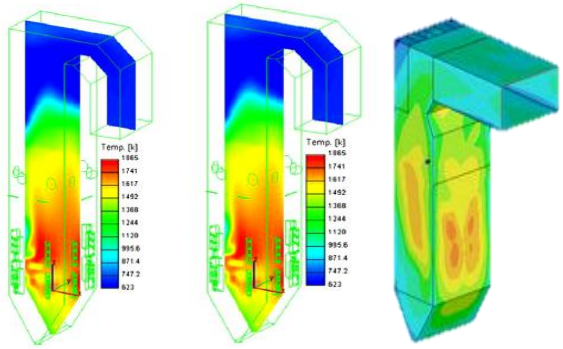
جدول (۱): مجاز انتشار آلاینده‌های هوا در نیروگاه‌ها

منبع آلاینده	آلاینده	واحد اندازه گیری	حد مجاز انتشار		توضیحات
			درجه ۱	درجه ۲	
دودکش‌ها و دستگاه انتقال حرارت	NO_X	mg/Nm^3	۱۵۰	۳۰۰	با سوخت گاز
		mg/Nm^3	۲۰۰	۴۰۰	با سوخت مازوت
		mg/Nm^3	۲۰۰	۲۵۰	با سوخت گازوئیل
	co	mg/Nm^3	۱۰۰	۲۰۰	با سوخت گاز

۶- مشخصات مشعل نیروگاه رامین :

* هر یک از بویلرهای نیروگاه رامین دارای 16 عدد مشعل می‌باشند.
* هشت عدد مشعل بر روی دیواره جلویی در دو طبقه قرار دارند.
* هشت عدد مشعل بر روی دیواره عقبی در دو طبقه قرار دارند.
* این مشعل‌ها با گاز طبیعی و سوخت مایع (مازوت) کار می‌کنند.
* مشعل‌های پایینی در ارتفاع9050 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 به‌صورت شکل شماره ۹ و۱۰و۱۱ می‌باشد[18].



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

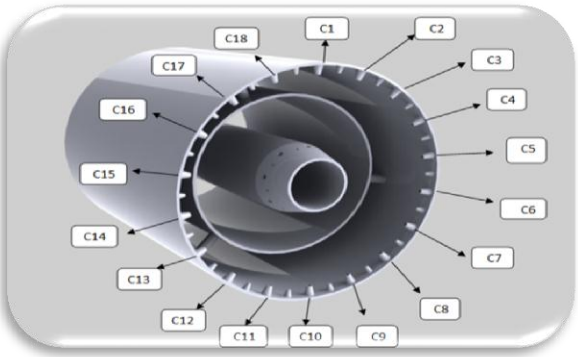
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]



شماره (۱۰): مشعل‌های دیواره جلویی بویلر

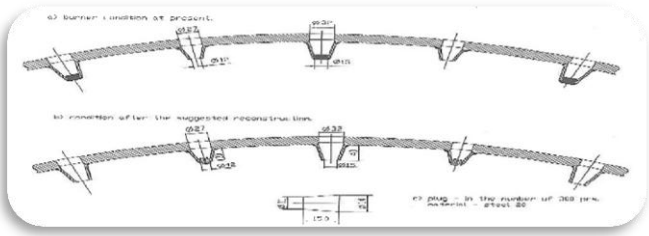


شکل (۱۱): مشعل‌های دیواره عقبی بویلر



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

کانال محیطی هر مشعل دارای ۳۶ نازل به‌صورت یک در میان و۱۸ نازل به قطر mm ۱۵ و ۱۸ نازل به قطر ۱۲mm میباشد شکل شماره ۱۲ و ۱۳و۱۴ و۱۵.



شکل (۱۳): نازل‌های محیطی مشعل بویلر



شکل (۱۴): نازل‌های مرکزی مشعل و اجزاء آن



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

۷-آلاینده‌های حاصل از سوخت‌های مصرفی نیروگاه‌ها

به‌طورکلی 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 دیگ 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 90% این مقدار از احتراق سوخت‌های فسیلی می‌باشد. جدول ۲ و۳ مقدار انتشار آلاینده‌ها ازجمله اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای ازت، اکسیدهای کربن، هیدرو کربنها و ذرات معلق را نشان می‌دهد.

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

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

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

۸- مشخصات شکل هندسی محفظه احتراق

محفظه احتراق استوانه ای 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 ۲۶۰mm در نظر گرفته شده است. هوای ورودی با سرعت بین ۳/۵ تا 7 m بر ثانیه از هشت مجرا وارد محفظه می گردد.

۹- مشخصات کوره

کوره مورد نظر از نوع تک مسیره بوده که انتقال حرارت در آن به صورت تشعشعی انجام می شود. ورودی سوخت شامل ۶ نازل سوخت می باشد که سوخت را به صورت شعاعی و محوری وارد کوره تزریق می کنند. روی هر لوله سوخت سه عدد دهانه ورودی سوخت قرار گرفته که یکی به صورت شعاعی و دو عدد دیگر به صورت ترکیبی (شعاعی و محوری) سوخت را وارد محفظه احتراق می کنند. هوا از سه مسیر شامل هوای مرکزی احتراق، هوای اولیه و هوای ثانویه وارد کوره می شود. هوای مرکزی پس از عبور از یک تثبیت کننده شعله با زاویه پره 45° وارد کوره می شود. 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 گونه های 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 استوانه ای به صورت زیر است.

(۱۸)

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

که در آن φ متغیر وابسته می باشد که می تواند جرم، مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی، نرخ اضمحلال انرژی جنبشی، آنتالپی و کسر جرمی اجزاء باشد Γφ .ضریب دیفیوژن و Sφ ترم مربوط به چشمه یا چاه حرارتی می باشد.

مدل سازی اکسید نیتروژن

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

(۱۹)

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

که در آن جمله چشمه SNO با توجه به سه مکانیزم تشکیل : NO حرارتی، NO سریع و NO سوختی، محاسبه می شود. با توجه به اینکه در احتراق سوختهای مایع مقدار NO سریع در مقایسه با دو نوع دیگر قابل صرفنظر کردن می باشد در این تحقیق NOحرارتی و سوختی محاسبه می شوند .NO حرارتی که به وسیله اکسیداسیون نیتروژن موجود در هوا در دماهای بالا تشکیل می شود، با استفاده از مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته بیان می گردد[-19].

(۲۰)

$$O+N_2 \xleftrightarrow{k_{\pm 1}} NO+N$$

(۲۱)

$$N+O_2 \xleftrightarrow{k_{\pm 2}} NO+N$$

(۲۲)

$$N+OH \xleftrightarrow{k_{\pm 3}} NO+H$$

که ±K 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 می آید.

(۲۳)

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

مقدار ثابت های نرخ واکنش‌های تعادلی فوق از مرجع به دست می-آید [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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

O2از محاسبات احتراق تعیین می شود و غلظت رادیکال[O] و [OH]از روابط زیر بدست می آید(20).

(24)

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

(24)

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

بنابراین بخشی از جمله چشمه معادله (۲) از مکانیزم زلدوویچ به صورت زیر محاسبه می شود.

(26)

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

که در آن MNO 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 مانندHCN ، CNو NH ،در اثر تجزیه حرارتی ترکیبات حاوی نیتروژن حاصل می شود که می توانند به NOx تبدیل شوند. با توجه به اینکه سیانید نیتروزن(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 NOو تشکیل N2 می باشد [۲۰].

$$HCN \xrightarrow{+O_2} NO \quad (27)$$

(28)

$$HCN \xrightarrow{+NO} N_2$$

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

$$R_2=A_2X_{HCN}X_{NO}\exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) \quad (29)$$

$$R_1=A_1X_{HCN}X_{O2}^{a}\exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) \quad (30)$$

که در روابط فوق X کسر مولی، 10 1/s، At= 3/5× 1012با می-باشد E2= 60000و Et= 67000cal/mol ، A2=3× توجه به اینکه NO در واکنش (۱۳)، تولید و در واکنش (۸) مصرف می شود جمله چشمه حاصل از NO سوختی برای معادله (۳۱) از رابطه زیر بدست می‌آید.

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

۱۱- اکسید نیتروژن انگیخته

در سال ۱۹۷۱، فنیمور نشان داد که واکنشهایی غیر از واکنشهای حرارتی در شعله در پیدایش اکسید نیتروژن مؤثرند و باعث تولید مقداری اکسید نیتروژن در منطقهٔ 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 معمولا در مخلوطهای غنی وجود دارد، منجر به تشکیل اکسید نیتروژن در منطقهٔ 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 شعلههای سوخت غنی نمایانتر است[۲۲].مطالعات بعدی وی بیانگر این مطلب هستند که اکسید نیتروژن انگیخته در شعلههای غی هیدروکربنی مشاهده نشده است. عامل این مکانیزم توسط فنیمور رادیکالهای هیدروکربنی معرفی شد[23]. 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]:

$$CH+N_2\rightarrow HCN+N \quad (32)$$

$$N+O_2\rightarrow NO+O \quad (33)$$

$$HCN+OH\rightarrow CN+H_2O \quad (34)$$

$$CN+O_2\rightarrow NO+CO \quad (35)$$

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

(34)

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

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

۱۲- حل عددی

معادلات حاکم شامل بقای جرم، مومنتم، اجزاء شیمیایی، آلایندگی و انرژی براساس روش حجم محدود حل شده است. به منظور دستیابی به حل مستقل از شبکهبندی، تعداد سلول های محاسباتی در سه حالت بررسی شده است. نتایج حاصل از ۳۲۰۰۰ شبکه مربعی سازمان یافته رضایتبخش بوده است و تغییر محسوسی نسبت به حالت های قبل نشان نمی دهد. معیار همگرایی برای معادله انرژی خطای نسبی و برای سایر معادلات بقا تعریف 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 می یابد اما به زمان و حافظه بیشتری نیاز می باشد. در این پژوهش ناحیه ورودی و نزدیک دیوارها که تغییرات خواص جریان بیشتر است، شبکه ظریفتر 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 گسسته سازی عبارت های جابجایی معادلات حاکم از طرح بالادستی مرتبه اول و برای تصحیح میدان فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است.

برای همگرایی از ضرایب تخفیف ۰/۷ برای میدان جریان و برای گونه‌های شیمیایی از جمله آلاینده ها، ۰/۹ استفاده شده است همچنین معیار همگرایی معادلات 10×1 6-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 و دبی جرمی هوای ۳ ورودی s/kg 364/8می باشد.

دمای ورودی سوخت و هوا ۳۰۰ درجه کلوین و فشار ورودی یک اتمسفریک در نظر گرفته شده است. دمای سطح دیواره محل نصب مشعل ۶۶۷ کلوین، دیواره روبروی مشعل ۸۰۰ کلوین، دمای سطح داخل بویلر دیواره های کناری ۷۲۶ کلوین و دمای سطح داخل بویلر دیواره سقف ۶۶۷ کلوین، با توجه به مقادیر تجربی فرض شده است. برای مدل سازی توربولانس از روش k-ε مدل RNG استفاده شده است.

۱۴-مدل ریاضی و روش حل عددی

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

(35)

$$(\rho u_i + \overline{\rho' u_i'})\frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_j}$$
$$\left(\rho\overline{u_j'\phi_j'} + u_j\overline{\rho'\phi'} + \overline{\rho' u_j'\phi'}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}\right) + S_\phi$$

که محاسبه ترمهای نوسانی $\varphi\ j\ j'\ '\ u$ وظیفه مدلهای اغتشاشی می باشند [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 وارده از طرف سیال، محاسبه می گردد. معادلات اندازهحرکت ذرات مایع با استفاده از موازنه نیروهای خارجی وارد بر قطره بدست میآیند (۱۵) که در راستای فرضی x بصورت زیر می باشد:

(36)

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

۱۵-مدل های تشکیل آلاینده ها

استیلن در اثر واکنشهای مختلف شیمیائی در هنگام احتراق هیدروکربن ها تشکیل می گردد و باعث تولید حلقه های بنزن اشباع شده می شود، حلقه های بنزن با یکدیگر ترکیب می شوند و تولید حلقه های بزرگتری می کنند که هیدروکربن های حلقوی و چند حلقه ای PAH نامیده می شوند. رشد هیدروکربن های حلقوی و چند حلقه ای سبب تشکیل ذرات جامد در فاز گاز می شود که به آنها، هسته دوده گفته می شود .با توجه به پیچیدگی فرایندهای فیزیکی و شیمیایی حاکم بر پدیده از مدلهای 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 می باشد. به طور عمده سه مکانیزم برای تولید NOx در احتراق مطرح می‌شود (۹)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

که عبارتند از مکانیزم گرمایی زلدوویچ 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 .

NOxسوختی، هنگامیکه حجم نیتروژن در سوخت بیش از ۰/۱ وزن سوخت باشد، به وسیله اکسیداسیون ترکیبات نیتروژن دار سوخت در ناحیه شعله تشکیل می شود 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 مولکول های نیتروژن و رادیکالهای هیدروکربن اکسیدهای نیتروژن تولید می گردد. تشکیل این اکسید اساسا به غلظت رادیکال در ناحیه اول شعله وابسته است و سهم آن در حالت احتراق با اکسیژن اضافی ناچیز است. در مخلوط های غنی از سوخت با وجود دماهای 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 معلومند، 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 معمولا دمای بالای سیکل در سیکلهای واقعی معلوم است، در تحلیل اولیه سیکل از این فرض استفاده شده Qin ت است. با در نظر گرفتن این که احتراق کامل باشد و محصولات احتراق به صورت زیر باشند خواهیم داشت:

(37)

$$C_xH_y+a(O_2+3.76N_2)+bH_2O\rightarrow n_1CO_2+n_2Co+n_3H_2O+n_4OH+n_5H+ n_6H_2+n_7N_2+n_8NO+n_9N+n_{10}NO_2+n_{11}O_2+n_{12}O+n_{13}C_xH_y$$

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

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

برای یافتن این ۱۳ مجهول نیاز به 38 معادله داریم. ۴ معادله از موازنه تعداد مولکولهای اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن و کربن حاصل میگردند و تعداد ۹ معادله مستقل دیگر نیز اساسا از معادلات غیرخطی تعادل حاصل میشوند که به طور توأم با چهار معادله قبلی حل میشوند. بنابراین برای حل یک سیستم CHON با محصولات بالا لازم است که چهار معادله خطی و نه معادله غیرخطی به طور همزمان حل شوند.

معادلات حاصل از موازنه اتمی:

(39)

$$x=n_1+n_2+n_{13}$$
$$y+2b=2n_3+n_4+n_5+2n_6+4n_{13}$$
$$2a+b=2n_1+n_2+n_3+n_4+n_8+2n_{10}+2n_{11}+n_{12}$$
$$2a\times3.76=2n_7+n_8+n_9+n_{10}$$

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

(40)

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

همان طور که بیان شد جهت حل معادله احتراق نیاز به ۹ معادله در کنار معادلات موازنه 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 مجهول جزء مولی محصولات احتراق به دست میآید.

(41)

$$CO_2\rightleftharpoons CO+\frac{1}{2}O_2 \qquad K_{p1}=\frac{x_2x_{11}^{1/2}}{x_1}P^{1/2}$$

(42)

$$H_2O\rightleftharpoons H_2+\frac{1}{2}O_2 \qquad K_{p2}=\frac{x_6x_{11}^{1/2}}{x_3}P^{1/2}$$

(43)

$$H_2O\frac{1}{2}H_2+OH \qquad K_{p3}=\frac{x_6^{1/2}x_4}{x_{\cdot}}P^{1/2}$$

(44)

$$\frac{1}{2}H_2\rightleftharpoons H \qquad K_{p4}=\frac{x_5}{x_6^{1/2}}P^{1/2}$$

(45)

$$\frac{1}{2}O_2\rightleftharpoons O \qquad K_{p5}=\frac{x_{12}}{x_{11}^{1/2}}P^{1/2}$$

(46)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

$$4H_2 + CO_2 \rightleftarrows CH_4 + 2H_2O \qquad K_{p6} = \frac{x_{13}\, x_3^{\,2}}{x_6^{\,4}\, x_1} P^{-2}$$

(47)

$$\frac{1}{2}N_2 \rightleftarrows N \qquad K_{p7} = \frac{x_9}{x_7^{\,1/2}} P^{1/2}$$

48

$$\frac{1}{2}N_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftarrows NO \qquad K_{p8} = \frac{x_8}{x_7^{\,1/2}\, x_{11}^{\,1/2}} P$$

49

$$\frac{1}{2}N_2 + O_2 \rightleftarrows NO_2 \qquad K_{p9} = \frac{x_{10}}{x_7^{\,1/2}\, x_{11}} P^{-1/2}$$

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

مکانیزم زلدویچ پیشرفته (حرارتی) نیتریک اکسید NO یکی از مهمترین اکسیدهای نیتروژن تولید شده در منابع احتراق میباشد. عموما عقیده بر ایـن اسـت که NO از نیتروژن موجود در اتمسفر تشکیل میشود. در احتراق سوختهای تمیز (سوختهایی کـه فاقـد ترکیبـات نیتروژنـی هستند)، اکسید نیتروژن اتمسفری-(NO) (توسط مکانیزم حرارتی یکی از عمدهترین منبع نشر و صدور NOx میباشد .آقای زلدویچ در سال ۱۹۴۶ دو واکنش زنجیرهای زیر را جهت تشکیل NO در واکنشهای احتراقی پیشنهاد داد که به ۱ مکانیزم زلدویچ (حرارتی) مشهور است

(50)

$$O + N_2 \rightleftarrows NO + N$$

$$N + O_2 \rightleftarrows NO + O$$

(51)

در سال ۱۹۷۰ آقای لاوی دو و همکارانش واکنش سوم زیر را به این دو واکنش افزودند و مکانیزم را زلدویچ پیشرفته نامیدند.

(52)

$$N + OH \rightleftarrows NO + H$$

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 O_2 یا از حمله اتم هیدروژن به O_2 در دماهای بالا، به مولکولهای نیتروژن میباشد .جهت تعیین ضرایب شدت این واکنشها روشهای اندازهگیری مستقیم و غیرمستقیمی وجود دارد که توسط تنی چنـد از محققین مورد استفاده قرار گرفتهاند و در مجموع ضرایب شدت به گونه زیر استخراج شدهاند

(53)

$$k_{N1f} = 1.8\times10^{11}\exp(-38370/T(K)) \quad m^3/kmol-s$$
$$k_{N1r} = 3.8\times10^{10}\exp(-425/T(K)) \quad m^3/kmol-s$$
$$k_{N2f} = 1.8\times10^{7}\exp(-4680/T(K)) \quad m^3/kmol-s$$
$$k_{N2r} = 3.8\times10^{6}\exp(-20820/T(K)) \quad m^3/kmol-s$$
$$k_{N3f} = 7.1\times10^{10}\exp(-450/T(K)) \quad m^3/kmol-s$$
$$k_{N3r} = 1.7\times10^{11}\exp(-24560/T(K)) \quad m^3/kmol-s$$

از مشخصههای بارز این مکانیزم (حرارتی) میتوان به موارد زیر اشاره کرد ß :واکنشهای این مکانیزم در مقایسه با واکنشهای فرآیند احتراق سوخت از سرعت خیلی پایینتری برخوردارند بنابراین NO حرارتی عموما در منطقه جلو شعله یا گازهای سوخته در نظر گرفته میشود ß . به علت انرژی اکتیواسیون نسبتا بالای واکنش اولی (kJ ۳۱۹۰۵۰) این مکانیزم شدیدا به دما (به صورت نمایی) وابسته است و به همین دلیل این مکانیزم را حرارتی مینامند ß .واکنش سوم این مکانیزم فقط در شرایط احتراق با سوخت غنی مهم میباشد ß .این مکانیزم در محدوده نسبت اکیوالانس ۰/۸ تا ۱/۰۵ منبع عمده تولید NO به شمار میرود .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 غلظتهای O ، OH، N2و (O2 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 معمولا 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 .حاصله از این مکانیزمها به NO موجود معروف است [۹] . الف ـ 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 NOدر سیستمهای احتراق با سوختهای هیدروکربنی، معمولا بیش 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

منطقه شعله میگردند. وی این NO را NO موجود) Prompt) نامید [۹]. مطالعات بعدی بیانگر این مطلب بودند که NO موجود فقط در شعلههای هیدروکربنی شکل میگیرد. با توجه به شکل‌گیری 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 میدهند در ادامه ترکیبات آمینها به ترکیبات میانی تبدیل شده که نهایتا 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.

$$CH + N_2 \rightleftharpoons HCN + N \quad (54)$$

(55)

$$CH_2 + N_2 \rightleftharpoons HCN + NH$$

(56)

$$HCN + O \rightleftharpoons NCO + H$$

(57)

$$NCO + H \rightleftharpoons NH + CO$$

(58)

$$NH + H \rightleftharpoons NH + CO$$

$$N + OH \rightleftharpoons NO + H \quad (59)$$

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 تخمین میزان نشر برای توسعه راهکارهای کنترل انتشار بسیار مهم می باشد. این فاکتور معمولاً براساس جرم آلاینده تولیدی بخش بر محصول یا ماده اولیه (واحد وزن، حجم، فاصله، انرژی تولیدی یا زمان انتشار آلاینده) بیان می شود. در نیروگاه ها فاکتور انتشار برحسب میزان جرم گازهای حاصل از احتراق برحسب انرژی الکتریکی تولیدی یا انرژی حرارتی مورد استفاده بیان می شود.

به طور کلی معادله تخمین انتشار به شرح زیر است(۱۹)

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

E = مقدار جرم آلاینده

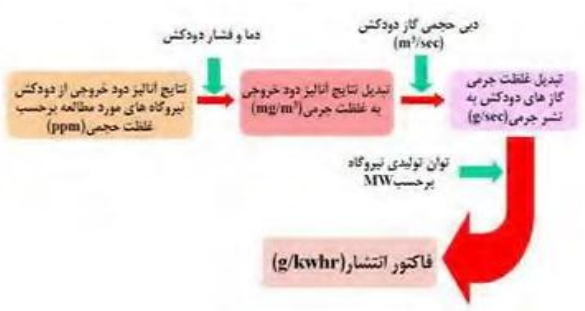
A = میزان تولید واحد صنعتی

EF = فاکتور انتشار

ER = 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 ان مشکلات متخصصین به دنبال روش هایی هستند که با هزینه کمتر و منطقی، اطمینان لازم را جهت محاسبه فاکتور انتشار فراهم آورد. 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 NOx و CO ارائه شده وبا توجه به روابط ترمودینامیکی حاکم بر گازها و موازنه 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 ومحاسبه 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 آلایندها محاسبه شده است .

۱- میزان دبی خروجی گازهای خارج شده از دودکش 10405 m^3/min

۲- میزان فلوی مصرفی گاز 77000 m^3/hr

۳- فلوی هوای ورودی به محفظه احتراق 56000 m^3/hr

۴- میزات تولید برق ۳۰۰ MW

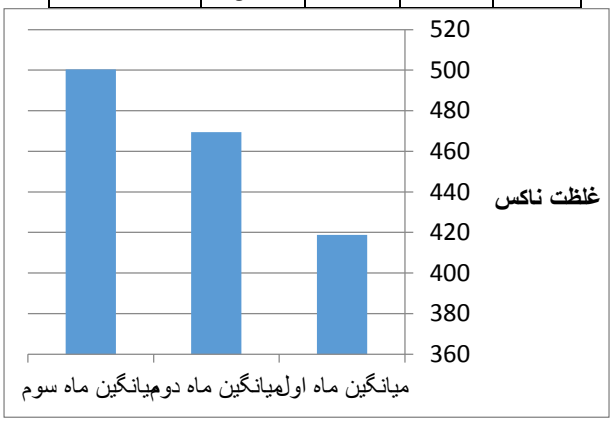
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

۱۹-میانگین غلظت جرمی آلایند ها در شرایط بهره برداری پایه در سه ماهه تابستان برحسب mg/Nm^3 :

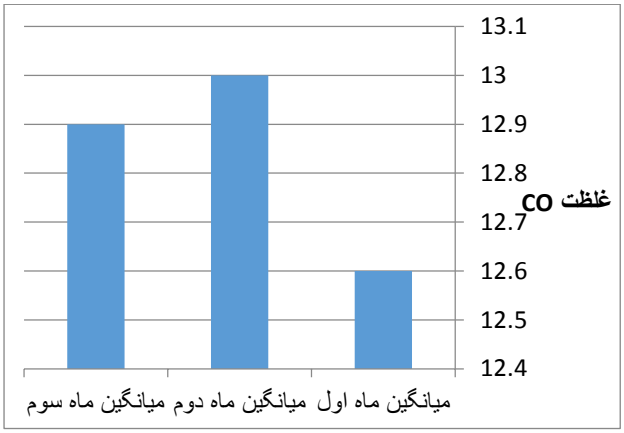
مطابق جدول شماره ۳ و نمودار شماره ۱ و ۲

جدول(۳): غلظت آلاینده ها در شرایط پایه

غلظت جرمی گازهای حاصل از احتراق	واحد اندازه گیری	میانگین ماه اول	میانگین ماه دوم	میانگین ماه سوم
Nox	mg/Nm^3	۴۱۸/۸	۴۶۹/۵	۵۰۰/۳
CO	mg/Nm^3	۱۲/۶	۱۳/۰	۱۲/۹



نمودار۱ - آلاینده NOX در حالت پایه

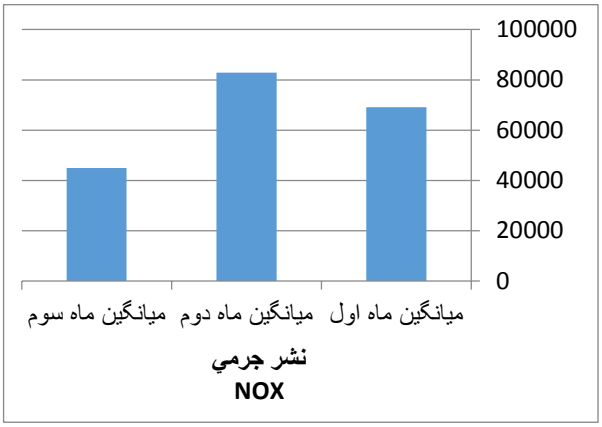


نمودار (۲): آلاینده co در حالت پایه

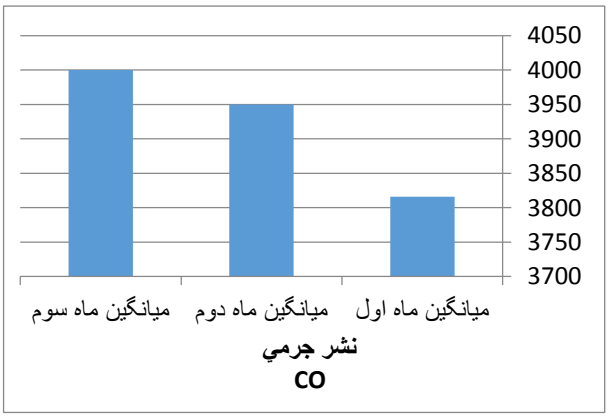
۲۰- تبدیل غلظت جرمی به نشر جرمی آلایندهها در شرایط بهره برداری پایه در سه ماهه تابستان بر حسب gr/s : مطابق جدول شماره ۴ ونمودار شماره ۳ و ۴

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	۴۵/۰۶
CO	gr/s	۳۸۱۶	۳۹۵۰	۴۰/۰



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



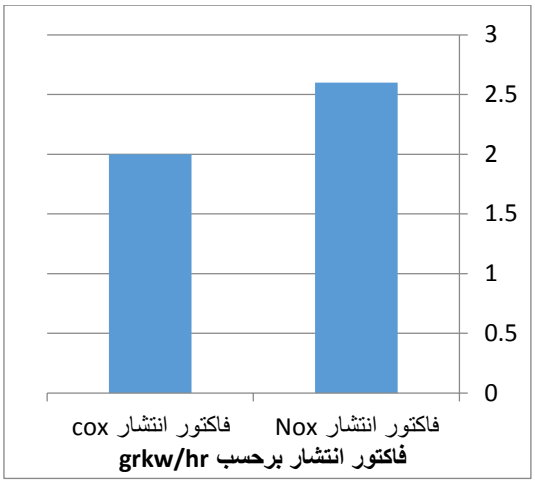
نمودار(۴): نشر جرمی co در حالت پایه بر حسب gr/s

۲۱- محاسبه میزان فاکتور انتشار آلاینده های خروجی از دود کش در حالت پایه برحسب grkw/hr : جدول شماره ۵ و نمودار۵

جدول(۵): فاکتور انتشار بر حسب grkw/hr

فاکتور انتشار	Nox	gr/kwhr	۲/۶
	CO	gr/kwhr	۲/۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]



نمودار(۵): فاکتور انتشار NO_XوCO بر حسب grkw/hr

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

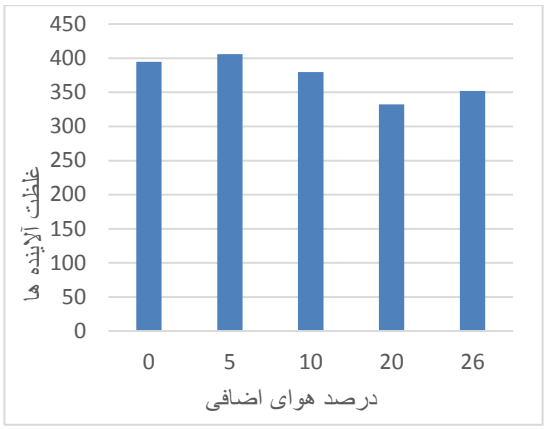
این اندازه گیری در سه مرحله انجام شد و با شرایط پایه مقایسه گردید . بدین شکل که در فاصله زمانی ۱۲ ساعته دمش هوای اضافی اعمال شد و میزان آلاینده ها اندازه گیری شد. جدول شماره ۶ و ۷ و نمودار ۶ و ۷

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

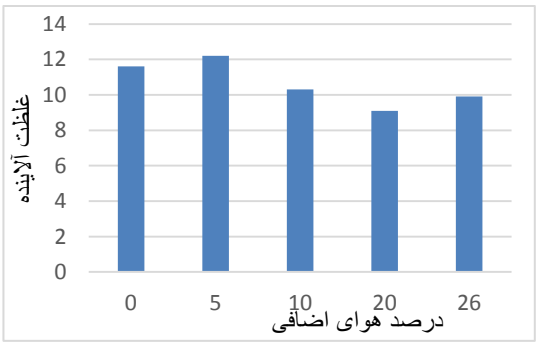
غلظت اندازه گیری	واحد اندازه گیری	نوع آلاینده
۳۹۵	mg/Nm^3	NOx
۱۱/۶	mg/Nm^3	CO

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

میزان آلاینده ها در شرایط اعمال هوای اضافی	نوع آلاینده	۵٪ درصد هوای اضافه	۱۰٪ در صد هوای اضافی	در صد هوای اضافی ۲۰٪	درصد هوای اضافی ۲۶٪	واحد اندازه گیری
میزان آلاینده ها در شرایط اعمال هوای اضافی	NOx	۴۰۶	۳۷۹/۶	/۶ ۳۳۲	۳۵۲	mg/Nm^3
میزان آلاینده ها در شرایط اعمال هوای اضافی	CO	۱۲/۲	۱۰/۳	۹/۱	۹/۹	mg/Nm^3



نمودار(۶): میزان nox در شرایط اعمال هوای اضافی به کوره



نمودار (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 آلاینده‌ها 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 $77m^3/h$ گاز طبیعی در نیروگاه می‌توان ۳۰۰MW 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 :

جدول (۸)

دبی مصرفی گاز برای 300 مگاوات برق = $77000m^3/h$
ارزشی حرارتی گاز طبیعی = $8200\ kCal/m^3$
$1\ Cal = 4.18\ j$
$\frac{77000 \times 8200 \times 4.18j}{3600 \quad s \quad \times 1000} = 727.11MW$
(راندمان نیروگاه ۰.۳۴) × ۷۲۸.۱۱۰
تولید 270 MW

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

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 ونتایج آن با اعمال دو حالت اغتشاش زیاد و کم مقایسه گردید. اعمال اغتشاش از طریق بر هم زدن توازن هوای ورودی وخروجی و کم و زیاد کردن سوخت گاز طبیعی می باشد. جدول شماره ۹ و ۱۰ و نمودار شماره ۷و۸

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

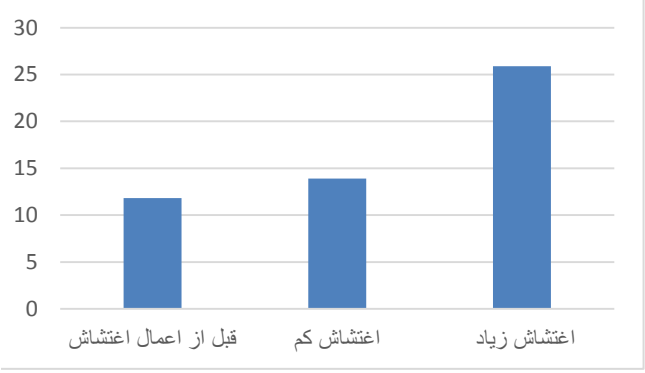
میزان آلاینده در حالت پایه	واحد	نوع آلایندگی در حالت پایه
۴۶۰/۸	mg/Nm^3	NOx
۱۱/۸		CO

جدول (۱۰): میزان آلاینده در حالت اعمال اغتشاش

اغتشاش زیاد	اغتشاش کم	واحد	نوع آلایندگی در حالت اغتشاش
۶۸۰/۷	**۵۹۰/۹**	**mg/Nm^3**	**NOx**
۲۵/۹	**۱۳/۹**		**CO**



نمودار (۷): nox در حالت اعمال اغتشاش



نمودار (۸): co در حالت اعمال اغتشاش

۲۴- نتایج :

۱- سوخت گاز در مقایسه با سوخت های دیگر نیروگاه آلودگی NO_Xو 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 MWتولید 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 .

۲۴ - موارد زیر در جهت 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 دمپرها

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 تاثیرگذارترین عوامل جهت نصب این سیستم ها، قیمت تمام شده این گونه تجهیزات است که نهایتاً در قیمت برق تولیدی تاثیرگذار 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

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 آلاینده‌های 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 نیروگاه‌هاست انتخاب انواع سوخت برای نیروگاه‌ها به پارامترهایی از قبیل میزان هزینه هر یک از انواع سوخت، موقعیت جغرافیایی نیروگاه، قابلیت دسترسی میزان، آلودگی‌های محیطی هر کدام از سوخت ها و حتی سیاست های میان مدت و بلندمدت حاکم بر بخش انرژی بستگی دارد. یکی از سیاست‌ها در خصوص مصرف سوخت نیروگاه ها در ارتباط با کاهش آلاینده ها، استفاده حداکثر از گاز طبیعی می باشد.

منابع :

[۱] 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.

[۲] سلیمانی، علی، بررسی مکانیزم‌های تولید NOx، پایان‌نامه 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 محیطیSOx و Nox 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 مشعل‌های 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 مکانیزم‌های تولید NOx، پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی، ۱۳۹۳

[8] جلیلیان، صمد، مولا، سید علی، تاثیر آلودگی هوا ناشی از اکسیدهای نیتروژن برسلامتی انسان،

[8] اسماعیل زاده محمد، بذر افشان ادریس، نصر آبادی مهناز. مدل‌سازی انتشار گازهای ۲SO و NOX خروجی از دودکش نیروگاه گازی توس مشهد. سلامت و محیط زیست. ۱۳۹۲; ۶ (۱) :۹۰-۷۷

[9] رمضان, مهدی و محسن کهرم، ۱۳۹۲، بررسی عددی اثرات چرخش هوای خروجی مشعلها در بویلرهای نیروگاه توس مشهد، پانزدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها (سیالات)، بندرعباس، انجمن فیزیک ایران، دانشگاه هرمزگان.

[9] فرداد, عباسعلی؛ محمد صدیقی؛ سیدمهدی حسینی بغدادآبادی و سهیلا خوشنویسان، ۱۳۸۸، بررسی تجربی اثر تغییر دبی سوخت و هوای مشعل گازسوز روی پارامتر های 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.\

[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

[۸] 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]

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 عباسعلی؛ محمد صدیقی؛ سیدمهدی حسینی بغدادآبادی و سهیلا خوشنویسان، ۱۳۸۸، بررسی تجربی اثر تغییر دبی 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 بویلرهای نیروگاه توس مشهد، 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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.5.0]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.30]