

## کاهش آلاینده‌های $NO_x$ در توربین‌های گازی نیروگاه مشهد در اثر خنک‌کاری هوای ورودی به کمپرسور

سالم بعنونی<sup>۱</sup>، سید مصطفی حسینعلی پور<sup>۲</sup>

دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک  
Banooni@scu.ac.ir

### چکیده

از جمله عوامل مؤثر در میزان توان خروجی توربین گاز، دمای محیط است. این عامل به حدی تعیین کننده و تأثیرگذار است که افزایش آن به میزان یک درجه سانتیگراد موجب کاهش توان خروجی توربین به مقدار ۰/۶ تا ۰/۹ درصد خواهد شد. یکی از راهکارهای مقابله با کاهش توان خروجی توربین گاز سرمایه‌گذاری هوای ورودی به کمپرسور است. پاشش آب در ورودی کمپرسور علاوه بر افزایش توان باعث کاهش آلاینده‌های  $NO_x$  نیز می‌شود. در این مقاله ضمن مدلسازی احتراق، انواع  $NO_x$  تولید شده در محفظه احتراق توربین گازی GE-F5 نیروگاه مشهد محاسبه و سرانجام یک مقایسه بین کاهش آلاینده‌های  $NO_x$  به روش تزریق بخار در محفظه احتراق و روش پاشش آب در ورودی (Fog) انجام شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که تزریق بخار در محفظه احتراق توربین گازی GE-F5 نیروگاه مشهد و روش Fog باعث کاهش تولید  $NO_x$  به ترتیب حداکثر به میزان ۷۰٪ و ۳۰٪ می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** توربین گاز، آلاینده‌های  $NO_x$ ، پاشش آب، محفظه احتراق، کانال هوای ورودی

### ۱- مقدمه

از آن جایی که توربین گازی مجموعه‌ای است که مستقیماً از هوای آزاد تنفس می‌کند، لذا هر عاملی که باعث تغییر شرایط آب و هوایی گردد موجب تغییر عملکرد توربین گازی خواهد شد. یکی از این عوامل تغییر دمای هوای ورودی به کمپرسور می‌باشد. توربین‌های گازی جزء ماشین‌های حجم ثابت محسوب می‌شوند و در دور ثابت، حجم ثابتی از هوا را از خود عبور می‌دهند. یکی از اثرات افزایش دمای ورودی (دمای محیط) کاهش چگالی هواست. افزایش دمای هوای ورودی به کمپرسور با افزایش کار کمپرسور و کاهش توان تولیدی توربین، باعث کاهش توان خالص خروجی به میزان ۰/۶ تا ۰/۹ درصد به ازای هر درجه سانتیگراد افزایش دما می‌شود [۱]. یکی از راه‌های مقابله با این اثرات سرمایه‌گذاری هوای ورودی است که در حالت کلی به دو دسته سیستم‌های خنک‌کن تبریدی و تبخیری تقسیم می‌شوند.

اساس خنک‌کاری تبخیری مبتنی بر تبخیر آب و استفاده از گرمای نهان تبخیر (حدود ۴/۱۸ کیلو ژول بر کیلو گرم) برای سرد کردن هوا می‌باشد که در عمل باعث کاهش دمای هوای محیط می‌شود. در سیستم خنک‌کاری Fog، آب توسط نازل‌های پر فشار به ذرات ریز تبدیل می‌شود. این ذرات با تبخیر شدن باعث خنک شدن هوا در ورودی توربین گاز می‌شود. در این روش می‌توان به رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد در ورودی توربین گاز رسید.

اکسیدهای نیتروژن  $NO_x$ ، یکی از محصولات فرعی احتراق سوخت‌های فسیلی (مانند نفت) و زغال و گاز طبیعی می‌باشند.  $NO_x$  در احتراق با دمای بالا در موتورها و بویلرهای صنعتی و توربین‌های گازی تولید می‌شود. دمای بالا باعث می‌شود که گاز بی‌خطر نیتروژن تجزیه و با اکسیژن ترکیب شود و به شکل یک آلوده‌کننده خطرناک درآید. در میان اکسیدهای

<sup>۱</sup> استادیار، دانشگاه شهید چمران، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی مکانیک

نیترژن درصد قابل توجهی را  $NO$  تشکیل می‌دهد. در واقع چنین مشخص شده که بیشتر  $NOx$  تولید شده در احتراق  $NO$  است. به همین دلیل در مدلسازی  $NOx$ ، فرآیندهای تولید  $NO$  مورد توجه قرار می‌گیرد [۲]. به منظور بررسی تحلیلی تشکیل  $NO$  در سیستم‌های سوخت- هوا محققین زیادی کوشش به عمل آورده‌اند. در مورد تشکیل  $NO$  سه مکانیزم مهم مشخص شده است که عبارتند از [۳]: ۱-  $NO$  حرارتی (Thermal  $NO$ )، ۲-  $NO$  موجود (Prompt  $NO$ ) و ۳-  $NO$  سوختی (Fuel  $NO$ ). که هر کدام شرایط و مشخصات مربوط به خود را دارند. سطوح غلظت آلودگی در خروجی توربین‌های گازی مستقیماً با دما، زمان و فرآیندهای احتراق مرتبط است [۳]. این خصوصیات از یک محفظه احتراق به دیگری و برای یک محفظه احتراق مشخص با توجه به تغییرات شرایط کارکرد، متغیرند. سینتیک‌های شیمیایی شکل‌گیری  $NO$  و  $NO_2$  (تشکیل و تخریب) امروزه به خوبی شناخته شده‌اند. همان گونه که قبلاً ذکر شد،  $NO$  از میان چند مکانیزم و تئوری‌های متفاوت شکل می‌گیرد و می‌توان آنها را به شکل زیر دسته‌بندی نمود [۳].

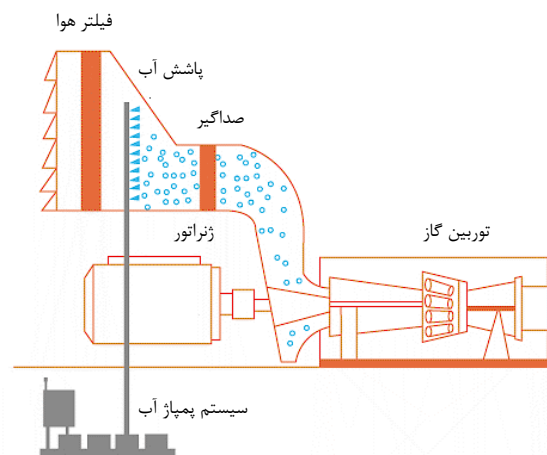
▪ مکانیزم زلدویچ پیشرفته ( $NO$  حرارتی)

▪ مکانیزم‌های سریع ( $NO$  موجود)

الف- مکانیزم فمینور، ب- مکانیزم با ترکیبات میانی  $N_2O$  ج- مکانیزم فوق تعادلی

▪ مکانیزم نیترژن تعادلی

تشکیل  $NO$  شدیداً به دما وابسته است از این رو یکی از روش‌های مطرح کاهش آن تزریق آب یا بخار در محفظه احتراق است. آقای سینگ و همکارانش (۱۹۷۲) مطالعات آزمایشگاهی خود را در زمینه کنترل اکسیدهای نیترژن در توربین گاز ارائه کردند که در این مطالعه به کاهش دما توسط تزریق آب در محفظه احتراق اشاره شده است [۴]. آقای هانگ (۱۹۷۴) یک رابطه تجربی برای کاهش  $NO$  بر حسب نسبت آب به سوخت ارائه کرد که برای سوخت‌های مایع و گاز به کار می‌رود [۵]. آقای تاوچتن مدلی برای کاهش  $NO$  توسط تزریق بخار بر اساس مکانیزم زلدویچ پیشرفته ارائه کرد [۶]. در سال ۱۹۹۶ نیز آقای موگان و همکارانش نتایج مطالعات تجربی خود را به صورت نمودارهای دما بر حسب فاصله از دیوارهای محفظه احتراق و فاصله نازل سوخت و کاهش  $NO$  بر حسب میزان تزریق بخار ارائه کردند [۷]. اثر پاشش آب در ورودی توربین‌های گازی بر روی آلاینده‌ها مطالعه کمی صورت گرفته است. در یک مطالعه تجربی اثر میزان پاشش آب بر روی درصد کاهش  $NOx$  بررسی شده و دیده شده است که با افزایش میزان آب ورودی به محفظه احتراق کاهش  $NOx$  افزایش یافته اما با توجه به محدودیت اشباع شدن هوا، این میزان نیز محدود است [۸]. هدف از این مطالعه تحلیل احتراق و مدلسازی مکانیزم‌های مختلف تولید  $NOx$  در محفظه احتراق توربین گازی و بررسی اثر روش‌های خنک‌کاری تبخیری هوای ورودی بر روی این گونه آلاینده‌هاست که نتایج آن با نتایج مطالعه صورت گرفته بر روی کاهش آلاینده‌های  $NOx$  توسط روش تزریق بخار در توربین‌های گازی نیروگاه مشهد مقایسه شده است [۲].

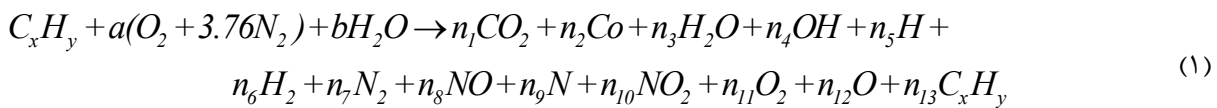


شکل ۱- شکل شماتیک از پاشش تحت فشار آب (Fog) در ورودی کمپرسور

## ۲- تحلیل احتراق و مدلسازی انواع $NO_x$

### ۲-۱- اجزای محصولات احتراق

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  $Q_{in}$  ثابت. چون معمولاً دمای بالای سیکل در سیکل‌های واقعی معلوم است، در تحلیل اولیه سیکل از این فرض استفاده شده است. با در نظر گرفتن این که احتراق کامل باشد و محصولات احتراق به صورت زیر باشند خواهیم داشت:



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

$$b = \frac{kg_{water}}{kg_{fuel}} \times \frac{M_{fuel}}{M_{water}} \quad (2)$$

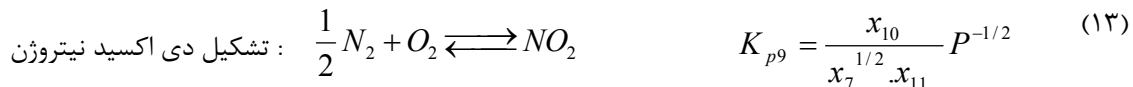
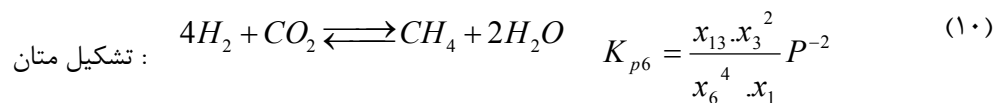
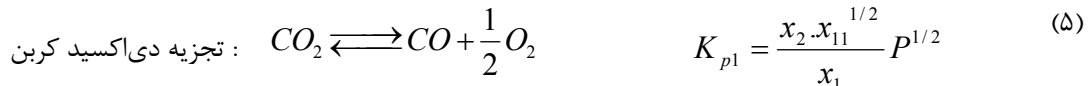
برای یافتن این ۱۳ مجهول نیاز به ۱۳ معادله داریم. ۴ معادله از موازنه تعداد مولکول‌های اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن و کربن حاصل می‌گردند و تعداد ۹ معادله مستقل دیگر نیز اساساً از معادلات غیرخطی تعادل حاصل می‌شوند که به طور توأم با چهار معادله قبلی حل می‌شوند. بنابراین برای حل یک سیستم CHON با محصولات بالا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

$$\begin{aligned} x &= n_1 + n_2 + n_{13} \\ y + 2b &= 2n_3 + n_4 + n_5 + 2n_6 + 4n_{13} \\ 2a + b &= 2n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_8 + 2n_{10} + 2n_{11} + n_{12} \\ 2a \times 3.76 &= 2n_7 + n_8 + n_9 + n_{10} \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

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.



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

## ۲-۲- مدل سازی انواع $NO_x$

### ۲-۲-۱- مکانیزم زلدویچ پیشرفته (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  $NO_x$  می‌باشد. آقای زلدویچ در سال ۱۹۴۶ دو واکنش زنجیره‌ای زیر را جهت تشکیل  $NO$  در واکنش‌های احتراقی پیشنهاد داد که به مکانیزم زلدویچ<sup>۱</sup> (حرارتی) مشهور است [۹].



در سال ۱۹۷۰ آقای لاوی<sup>۲</sup> و همکارانش واکنش سوم زیر را به این دو واکنش افزودند و مکانیزم را زلدویچ پیشرفته نامیدند [۹].



سهام 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

<sup>1</sup> Zeldovich

<sup>2</sup> Lovoie et. al.

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 غیرمستقیم وجود دارد که توسط تنی چند از محققین مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در مجموع ضرایب شدت به گونه زیر استخراج شده‌اند [۹].

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

از مشخصه‌های بارز این مکانیزم (حرارتی) می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

▪ واکنش‌های این مکانیزم در مقایسه با واکنش‌های فرآیند احتراق سوخت از سرعت خیلی پایین‌تری برخوردارند بنابراین  $NO$  حرارتی عموماً در منطقه جلو شعله یا گازهای سوخته در نظر گرفته می‌شود.

▪ به علت انرژی اکتیواسیون نسبتاً بالای واکنش اولی (۳۱۹۰۵۰ kJ) این مکانیزم شدیداً به دما (به صورت نمایی) وابسته است و به همین دلیل این مکانیزم را حرارتی می‌نامند.

▪ واکنش سوم این مکانیزم فقط در شرایط احتراق با سوخت غنی مهم می‌باشد.

▪ 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  $O$ ،  $OH$ ،  $N_2$  و  $O_2$  (غلظت اتم‌های نیتروژن با تقریب حالت پایدار از معادلات اول و دوم) محاسبه می‌گردد.

## ۲-۲-۲ مکانیزم‌های سریع (Prompt)

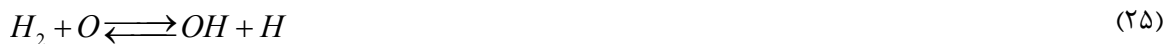
این دسته از مکانیزم‌های تشکیل  $NOx$  که خود به سه دسته تقسیم می‌شوند معمولاً خیلی سریع شکل می‌گیرند و با واکنش‌های احتراق سوخت درگیری بیشتری نسبت به مکانیزم حرارتی دارند و با احتراق سوخت به طور همزمان انجام می‌شوند. به همین دلیل این مکانیزم‌ها باعث تشکیل  $NO$  در منطق شعله می‌گردند.  $NO$  حاصله از این مکانیزم‌ها به  $NO$  موجود معروف است [۹].

الف - مکانیزم فمینور: اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که زمانی که پروپیل‌های 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 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 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 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.



داده‌های موجود بیانگر این مطلب هستند که مکانیزم فوق به علت شکل‌گیری 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 می‌باشد و می‌توان آنها را با تقریب با فرض سه واکنش سریع زیر برای  $OH$  و واکنش سوختن  $CO$  در حال تعادل محاسبه نمود.



ب - مکانیزم فوق تعادلی: اساس این مکانیزم بر پایه مکانیزم حرارتی پیشرفته است اما به علت شکل‌گیری در منطقه جبهه شعله شرط تعادل برای غلظت رادیکال‌های  $O$  صادق نیست. در این ناحیه غلظت رادیکال‌های  $O$  همان گونه که قبلاً ذکر گردید زیادتر از مقدار در حال تعادل آن است و با اعمال شرایط فوق تعادل برای آن، نتایج حاصله همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارند.

ج - مکانیزم تشکیل  $NO$  با ترکیبات میانی  $N_2O$ : این مکانیزم که توسط واکنش‌های زیر شکل می‌گیرد در شعله‌هایی با سوخت فقیر ( $\Phi < 0.8$ ) و شرایط دمایی پایین جوابگو است. در این مکانیزم همان گونه که از نام آن بر می‌آید  $N_2O$  به عنوان یک ترکیب میانی عمل می‌کند.



این مکانیزم نیز در ناحیه شعله شکل می‌گیرد. در این قسمت نیز غلظت رادیکال‌ها را از شرایط فوق تعادل به دست می‌آورند. به طور کلی به  $NO$  حاصله از سه مکانیزم فوق،  $NO$  موجود می‌گویند.

### ۲-۳- مکانیزم سوخت - نیتروژن

در آزمایشات متعدد مشخص گردیده است که  $NO$  خروجی از سیستم‌های احتراقی که با سوخت حاوی نیتروژن کار می‌کنند بیشتر است یا به عبارت دیگر نیتروژن داخل سوخت منبع مهمی از  $NO$  به شمار می‌رود. بنابراین سوخت‌های ویژه‌ای که ساختمان مولکولی آنها شامل نیتروژن می‌باشد، یک منبع مهم جهت نشر و تولید  $NO$  به شمار می‌رود. از نمونه بارز این

سوخت‌ها می‌توان به ذغال اشاره کرد که حاوی مقداری نیتروژن (۲٪ جرمی) می‌باشد. در احتراق این گونه سوخت‌ها، نیتروژن درون سوخت سریعاً به هیدروژن سیانید  $HCN$  یا آمونیاک  $NH_3$  تبدیل می‌شود و بقیه مراحل همانند مکانیزم فمینور است. در این مطالعه از سوخت تمیز استفاده شده است ( $CH_4$  به عنوان بخش عمده گاز طبیعی)

### ۲-۳- فرضیات مدل تخمین $NO$

این مدل بر اساس مراحل زیر است:

- غلظت  $N_2$  به دلیل مقدار زیاد آن ثابت در نظر گرفته شده است.
- در طول مدت زمان تشکیل  $NO$  حرارتی غلظت رادیکال‌های اکسیژن نیز در اثر دمای بالای قسمت جلوی شعله، در حال تعادل باقی می‌ماند.
- تشکیل  $NO_x$  ها به صورت  $NO$  در نظر گرفته شده‌اند، همچنین  $NO_2$  هایی که در خروجی عملی یافت می‌شوند در این جا توسط اکسیداسیون به شکل  $NO$  در نظر گرفته شده‌اند.  $NO_2$  فقط در بارهای پایین، در توربین‌های گازی صنعتی مهم می‌باشد. در بار پایه مقدار  $NO_2$  کمتر از ۰.۵٪ کل  $NO_x$  می‌باشد.
- شایان ذکر است که فقط سوخت‌های تمیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند و محاسباتی جهت محاسبه  $NO$  تولیدی از نیتروژن سوخت به عمل نیامده است.
- در طول مدت زمان تشکیل  $NO$  حرارتی سینتیک هیدروکربن‌ها و محصولات احتراق در حال تعادل هستند.

### ۲-۴ مدل تخمین $NO$ حرارتی

$NO$  حرارتی از مکانیزم پیشرفته زلدویچ محاسبه می‌شود. با فرض حالت دائم برای غلظت اتم‌های نیتروژن نرخ تشکیل  $NO$  عبارتست از  $[Y]$ :

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{N1f}[O] \left\{ \frac{[N_2] - k_{n1,r}k_{n2,r}[NO]^2 / k_{n2,f}k_{n3,f}[O_2]}{1 + k_{n1,r}[NO] / (k_{n2,f}[O_2] + k_{n3,f}[OH])} \right\} \quad (31)$$

با اطلاع از شدت واکنش‌های فوق، این رابطه توسط روش اویلر جهت یافتن مقدار  $NO$  تولیدی حل می‌شود. ورودی‌ها لازم برای حل این معادله عبارتند از: دما، زمان اقامت و غلظت‌های اولیه  $N_2, O_2, O, OH, NO$ . فشار از معلومات در نظر گرفته شده است. غلظت اولیه  $NO$  برای حل، غلظت  $NO$  موجود در نظر گرفته می‌شود. زمان اقامت  $NO$  حرارتی نیز از فرمول تجربی زیر محاسبه می‌شود  $[Y]$ :

$$t \propto \frac{D}{V(0.5 + 0.22[\lambda - 1])} \quad (32)$$

با توجه به نوع محفظه احتراق، با اعمال یک مقدار ثابت رابطه تناسب به تساوی تبدیل می‌شود. در این رابطه  $D$  قطر محفظه احتراق،  $V$  سرعت جت هوا،  $\lambda$  درصد هوای تئوری تقسیم بر صد که ماکزیمم آن ۳/۵ است.

### ۳-۵ مدل تخمین $NO$ موجود

با فرض این که  $NO$  موجود در یک شعله نفوذی در نسبت اکیوالانس استوکیومتری شکل بگیرد آقای فمینور رابطه تجربی زیر را برای تولید  $NO$  موجود ارائه کرد  $[9]$ :

$$[NO]_p = X_{CH} f(\Phi) P^{1/2} [NO]_{eq} \quad (33)$$

در این معادله  $X_{CH}$  برای سوخت‌های هیدروکربنی برابر با ۱ است و برای بقیه سوخت‌ها صفر است. (با توجه به این که  $NO$  موجود فقط در سوخت‌های هیدروکربنی یافت می‌شود).  $f(\Phi)$  یک تابع تجربی از نسبت اکیوالانس با مقدار ۰/۰۱۶ در حالت استوکیومتری است.  $P$  فشار بر حسب اتمسفر بوده و  $[NO]_{eq}$  غلظت در حال تعادل  $NO$  محسوب می‌شود. بنابراین با

مشخص بودن مقدار  $NO$  موجود جهت حدس اولیه، تخمین  $NO$  حرارتی توسط مدل سینتیکی ارائه شده به راحتی صورت می‌پذیرد.

### ۳- نتایج مدل‌سازی محفظه احتراق و تولید $NO_x$ در توربین گاز GE-F5 نیروگاه مشهد

بعد از معرفی انواع  $NO_x$  و مکانیزم‌های تولید آن در محفظه احتراق، در این قسمت تأثیر پاشش آب در ورودی کمپرسور (Fog) و تزریق آب در محفظه احتراق بر میزان تولید  $NO_x$  بررسی می‌شود. همان طور که قبلاً نیز گفته شد مهمترین و بهترین روش کاهش  $NO_x$  در توربین‌های گازی، روش تزریق بخار در محفظه احتراق است. در سیستم Fog همان طور که اشاره شد هدف اصلی افزایش توان تولید در فصل‌های گرم سال می‌باشد و کاهش آلاینده‌ها و به خصوص میزان  $NO_x$  از مزایای این سیستم در کنار افزایش توان می‌باشد.

جهت اختصار از بیان مدل‌سازی سیکل و اثرات سرمایه‌های ورودی بر کارکرد آن صرف نظر شده و بر روی نتایج مربوط به احتراق و آلاینده‌ها تمرکز شده است. نتایج این تحلیل بر روی سیکل توربین گاز GE-F5 نیروگاه مشهد با مشخصات درج شده در جدول (۱)، در شرایط طراحی (دمای  $40^\circ C$  و رطوبت ۱۰٪) و سرمایه‌های تا حالت اشباع در جدول (۲) آمده است.

جدول ۱- مشخصات توربین گاز GE-F5 در شرایط ایزو

۱۵	دمای ورودی $^\circ C$
٪۶۰	رطوبت نسبی ورودی
۱۰۱/۳۲۵	فشار ورودی kpa
۹۱/۶۲۲	دبی حجمی هوا $M^3/s$
۷/۵	نسبت فشار کمپرسور
۱۱۱/۱۱	دبی جریان هوا (در شرایط ایزو) kg/s
٪۸۵	راندمان آدیباتیک کمپرسور
٪۸۷	راندمان آدیباتیک توربین
۱۲۱۷	دمای ورودی به توربین K
٪۴	افت فشار محفظه احتراق
٪۵	درصد هوای خنک‌کننده پره توربین

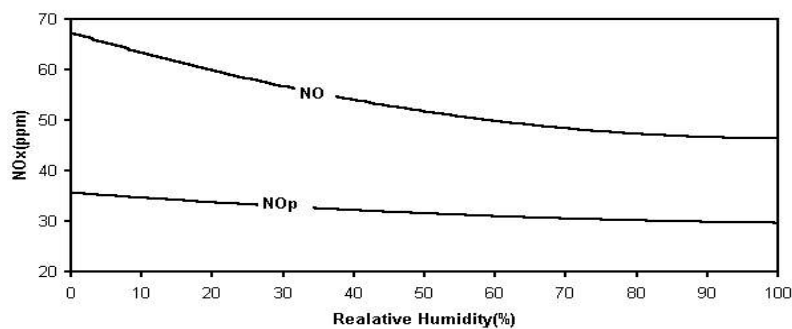
جدول ۲- مقدار  $NO_x$  بر اساس سرمایه‌های تبخیری از رطوبت ۱۰٪ تا حالت اشباع

رطوبت نسبی	رطوبت مطلق	دمای محفظه احتراق (K)	$NO_{x,p}$ (PPM)	$NO_x$ (PPM)
۱۰	۰/۰۰۴۷	۱۲۱۷	۳۵/۴۸	۶۵/۴۳
۲۰	۰/۰۰۶۹	۱۲۰۷	۳۴/۱	۶۰/۵۵
۳۰	۰/۰۰۸۵	۱۱۹۸	۳۳/۰۶	۵۶/۴۸
۴۰	۰/۰۰۹۶	۱۱۹۱	۳۱/۴	۵۲/۱۲
۵۰	۰/۰۱۰۵	۱۱۸۵	۳۱/۶۲	۵۱/۸۹
۶۰	۰/۰۱۱۳	۱۱۷۹	۳۱/۰۴	۵۰/۱۸
۷۰	۰/۰۱۲	۱۱۷۵	۳۰/۱۶	۴۸/۸۶
۸۰	۰/۰۱۲۶	۱۱۷۱	۳۰/۲	۴۷/۶۸
۹۰	۰/۰۱۳۱	۱۱۶۹	۲۹/۹۱	۴۶/۱۸
۱۰۰	۰/۰۱۳۶	۱۱۶۷	۲۹/۶۵	۴۶

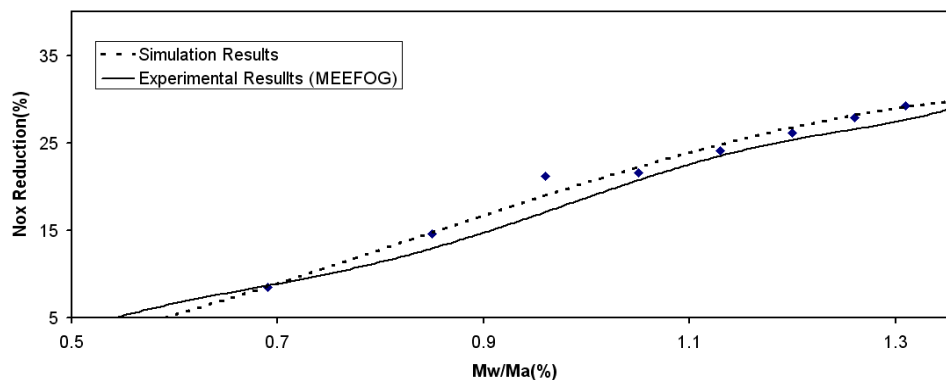


در شرایط طراحی (دما ۴۰ درجه سانتیگراد و رطوبت ۱۰٪) دمای مرطوب ۱۸/۲۳ درجه سانتیگراد است. بنابراین حداکثر پتانسیل خنک‌کاری حدود ۲۲ درجه سانتیگراد می‌باشد. دبی جرمی هوا در این شرایط ۹۸/۱۴ کیلوگرم بر ثانیه در برابر ۱۱۱/۱۱ کیلوگرم بر ثانیه در حالت ایزو است که در این حالت پاشش آب حدود ۱۰۴ کیلوگرم بر ثانیه است. مقدار  $NO_x$  در حالت طراحی ۶۵/۴۸ ppm است که در صورت سرمایه‌ش هوای ورودی تا حالت اشباع به ۴۶ ppm می‌رسد که حدود ۷۰/۲۷٪ میزان حالت طراحی است. این در حالی است که با پاشش ۱/۹٪ بخار آب نسبت به هوای عبوری در محفظه احتراق می‌توان  $NO_x$  را به ۲۰/۵۵ ppm رساند که حدود ۳۲٪ حالت طراحی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که راه‌حل اصلی کاهش  $NO_x$  تزریق بخار در محفظه است اما پاشش آب در ورودی کمپرسور در کنار افزایش توان ناشی از آن، با کاهش حدود ۳۰٪ در میزان  $NO_x$  در کاهش آلاینده‌های توربین گاز نیز مؤثر است.

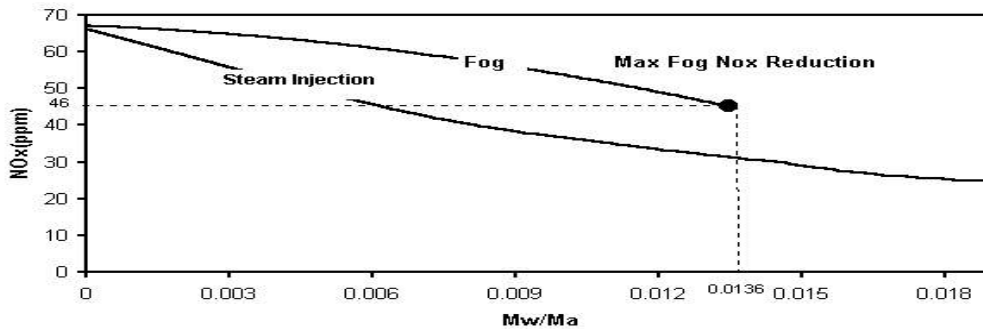
در شکل (۲) تغییرات میزان تولید  $NO_x$  (کل و موجود) با میزان آب پاشش شده در ورودی کمپرسور را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود بیشتر کاهش  $NO_x$  در اثر کاهش  $NO_x$  حرارتی است که به دمای شعله وابسته است. همچنین در شکل (۳) درصد کاهش  $NO_x$  بر حسب درصد آب موجود در هوا با نتایج ارائه شده توسط [۲] مقایسه شده است. انطباق خوبی بین نتایج مدل‌سازی و نتایج تجربی مشاهده می‌شود. در نمودار شکل (۴)، کاهش  $NO_x$  به روش‌های پاشش آب در ورودی کمپرسور و تزریق بخار در محفظه احتراق (دمای آب تزریق شده ۳۰۰ درجه کلین)، با هم مقایسه شده است. در پاشش مستقیم به دلیل کاهش بیشتر دمای شعله،  $NO_x$  حرارتی و در نتیجه مقدار کل آن به نسبت بیشتری کاهش یافته است.



شکل ۲- نمودار کاهش  $NO_x$  ( $NO$  موجود و  $NO$  کل) توسط سرمایه‌ش هوای ورودی به کمپرسور تا حالت اشباع در توربین گاز GE-F5



شکل ۳- نمودار درصد کاهش  $NO_x$  توسط سرمایه‌ش هوای ورودی به کمپرسور بر حسب درصد آب به هوای ورودی توربین گاز GE-F5



شکل ۴- نمودار کاهش  $NO_x$  بوسیله دو روش سرمایش هوای ورودی به کمپرسور و تزریق آب (۳۰۰ درجه کلوین) در محفظه احتراق بر حسب جرم آب به هوای ورودی به محفظه احتراق توربین گاز GE-F5

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به بحث‌های صورت گرفته در قسمت‌های قبلی نتایج زیر را می‌توان از تحلیل مزبور برشمرد:

- برای توربین گاز GE-F5 با شرایط ذکر شده، روش تزریق بخار به میزان ۷۰٪ و روش Fog به میزان ۳۰٪ تولید  $NO_x$  کاهش می‌یابد.
- در شرایط ذکر شده در بالا، روش سرمایش هوای ورودی به روش Fog حدود ۴۳٪ روش تزریق بخار در محفظه احتراق در کاهش  $NO_x$  سهم دارد.
- سرمایش هوای ورودی و به دنبال آن کاهش دمای محفظه احتراق بیشتر بر میزان تولید  $NO$  حرارتی تأثیر می‌گذارد و اثر آن بر میزان تولید  $NO$  موجود کم است.
- کاهش  $NO_x$  به روش سرمایش هوای ورودی با روش‌های تبخیری محدود بوده و حداکثر تا سرمایش حالت اشباع می‌تواند بر شرایط محفظه احتراق تأثیر بگذارد. این امر در روزهای مرطوب که میزان سرمایش کاهش می‌یابد محدودیت ایجاد می‌کند.

#### مراجع

- ۱- بعنونی، س، افزایش توان توربین‌های گازی با فناوری Fog، همایش افزایش توان توربین‌های گازی با سرمایش هوای ورودی، معاونت انرژی وزارت نیرو، ۱۳۸۱
- ۲- فروزانی، س، کاهش  $NO_x$  با تزریق بخار در محفظه احتراق، پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۱
- 3- Turns, S.R., and Mantel, S.J., An Introduction to Combustion, 2nd Edition, McGraw Hill, 2000.
- 4- Sing, P.P., Young, W.E., Ambrose, M.J., Formation and control of oxides of nitrogen emission from gas turbine combustion systems, ASME Journal of engineering for power, vol. 94, pp 271-278, 1972
- 5- Lefebvre Arthur H., Gas turbine combustion, Taylor and Francis Ltd, 1999
- 6- Touchton, G.L., An experimental verified  $NO_x$  prediction algorithm incorporating the effect of steam injection, ASME Journal of engineering for gas turbine and power, vol. 106, 833-840, 1984
- 7- Maughan, J.R., Bowen, J.H., Cooke, D.H., Reducing gas turbine emission through Hydrogen – enhanced steam – injected combustion, ASME Journal of engineering for gas turbine and power, vol. 118, pp. 341-350, 1996
- 8- Tomas, R., Reduction of gas turbine  $NO_x$  emission by inlet air fogging, WWW.MEEFOG.COM
- 9- Toof, J.L., A model for the prediction of thermal, prompt and fuel  $NO_x$  emission from combustion turbines, ASME Journal of engineering, vol. 108, pp. 340-347, 1986