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

کد مقاله: CCI2014
Archive of SID

بررسی اثر ترکیب درصد اجزای سوخت گاز طبیعی بر روی میزان انتشار آلاینده های ناشی از احتراق در توربین های گازی

علیرضا ظهیری[1]، محمد قدیمی[2]، فرزاد برهان آزاد [3]

تهران- پژوهشگاه نیرو-گروه شیمی وفرایند
AZAHIRI@NRI.AC.IR

چکیده

در اثر احتراق گاز طبیعی در توربین های گازی، آلاینده های مختلفی بوجود می آید. مهمترین آلاینده در احتراق گاز طبیعی و توربین های گازی NOx می باشد که نسبت به سایر آلاینده ها وابستگی بسیار زیادی به کیفیت و ترکیب درصد اجزای سوخت دارد. تغییرات عمده در ترکیب درصد اجزای سوخت موجب تغییر عملکرد توربین و افزایش میزان انتشار آلاینده ها بویژه NOx می شود. چندین مکانیزم برای تشکیل NOx در اثر احتراق گاز طبیعی در توربین گازی وجود دارد که مهمترین مکانیزم و بیشترین انتشار مربوط به NOx حرارتی وNOx ناشی از واکنش میانی N_2O می باشد. با افزایش ترکیب درصد هیدروکربن های سنگین تر موجود در گاز طبیعی که بعنوان سوخت در توربین گاز استفاده می شود، میزان انتشار آلاینده ها بویژه NOx افزایش می یابد

واژه‌های کلیدی: احتراق- گاز طبیعی- توربین گاز- آلاینده- NOx

1- مقدمه

اکثر توربین های گازی از سوخت مایع یا گازی استفاده نموده و برخی از آنها قابلیت کار نمودن با هر دو نوع سوخت را دارا می باشند. امروزه توربین های گاز بدلیل هزینه پایین، سهولت نصب و راه اندازی، راندمان و قابلیت اطمینان بالا، کم آلاینده بودن و انعطاف پذیری وسیع بسیار مورد توجه و استفاده قرار گرفته اند.

مبنای انتخاب سوختی که در توربین های گازی استفاده می شود دسترسی آسان، ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی می باشد. گاز طبیعی بدلیل هزینه پایین، دسترسی مناسب و میزان آلایندگی پایین انتخاب مناسبی برای استفاده در توربین های گازی می باشد. سوخت های گازی که در توربین های گاز استفاده می شود مشتمل بر گازهای قابل احتراق و یا مخلوطی از گازهای قابل احتراق و گازهای خنثی می باشد. سوخت های گازی دارای کیفیت مختلف از کیفیت پایین مانند گاز سرچاه تا کیفیت بالا مانند گاز خط لوله خانگی می باشد. کیفیت و ترکیب درصد اجزای سوخت تاثیر بسزایی برروی عملکرد و عمر مفید توربین و آلاینده های منتشر شده از توربین دارد. در مورد انتشار آلاینده های توربین گازی و دود مرئی خروجی از دودکش آنها از طرف سازمانهای حفاظت محیط زیست قوانین و مقررات سختگیرانه ای وضع گردیده و بهره برداران توربین های گازی ملزم به رعایت نمودن محدودیت ها و مقررات وضع شده درمورد انتشار آلاینده ها می باشند.[1]

1- کارشناس ارشد مهندسی شیمی
2- کارشناس ارشد مهندسی شیمی
3 - کارشناس مهندسی شیمی

www.SID.ir

Archive of SID

2- مشخصات گاز طبیعی

گاز طبیعی غالباً از متان و مقادیر کمی از هیدروکربن های سنگین تر مانند اتان، پروپان، بوتان، پنتان و C_6^+ تشکیل شده است. در برخی حالات گاز طبیعی شامل مقادیر کمی از هیدروژن، دی اکسید کربن، نیتروژن، اکسیژن، ترکیبات گوگردی و آب نیز می باشند. ارزش حرارتی گاز طبیعی به درصد هیدروکربن ها و گازهای بی اثر موجود در آن بستگی دارد و با توجه به کیفیت آن در محدوده 800 تا 1200 BTU/SCF می باشد. کیفیت گاز طبیعی با توجه به ترکیب درصد اجزای آن متفاوت می باشد. در جدول (1) ترکیب درصد اجزا و مشخصات یک گاز سرچاه و گاز ورودی به یک نیروگاه در داخل کشور ارائه گردیده است.

جدول (1)- مشخصات و ترکیب درصد اجزای یک گاز سرچاه و یک گاز ورودی به یک نیروگاه در داخل کشور

اجزا	درصد مولی (Mole %)	
	گاز طبیعی سر چاه	گاز طبیعی ورودی به نیروگاه
دی اکسید کربن	1/557	0
سولفید هیدروژن	0/16	0
نیتروژن	0/510	5/34
هیدروژن	0	0/01
متان	83/048	88/59
اتان	9/181	4/16
پروپان	4/225	1/18
ایزو بوتان	0/443	0/22
نرمال بوتان	0/732	0/29
ایزو پنتان	0/084	0/06
نرمال پنتان	0/06	0/06
وزن مخصوص	0/6764	0/618
ارزش حرارتی (BTU/Ft^3)	1038	977

کیفیت و ترکیبات سوخت تاثیر مستقیمی برروی بسیاری از خواص احتراق دارد که مهمترین آنها عبارتند از نرخ گرمای آزادشده، سرعت سوختن، میل به خوداشتعالی و دمای شعله آدیاباتیک. با توجه به اینکه در توربین های گاز محفظه احتراق برای یک تلرانس ویژه و محدودی طراحی شده اند، تغییرات عمده در این خواص پس از یک دوره زمانی کوتاه عملکرد توربین از قبیل انتشار آلاینده ها، دینامیک احتراق و برنامه تعمیر و نگهداری را تحت شعاع قرار خواهد داد. [2]

2- آلاینده های ناشی از احتراق گاز طبیعی

از مهمترین منابع آلوده کننده گاز طبیعی می توان به جامدات، آب، روغن کمپرسور، گازهای سنگین، سولفید هیدروژن، هیدروژن، مونواکسید و دی اکسید کربن اشاره نمود. در اثر احتراق گاز طبیعی با توجه به کیفیت و ترکیب درصد اجزای سوخت آلاینده های مختلفی انتشار می یابد که این آلاینده ها با ذکر منابع تولیدشان در جدول (2) معرفی گردیده اند. [3و4]

با توجه به جدول (2) مهمترین آلاینده ها NOx می باشد و کیفیت و ترکیب درصد اجزای سوخت تاثیر بسزایی برروی انتشار آلایندها بویژه NOx دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (2): آلاینده های خروجی از توربین گازی با سوخت گاز طبیعی[4]

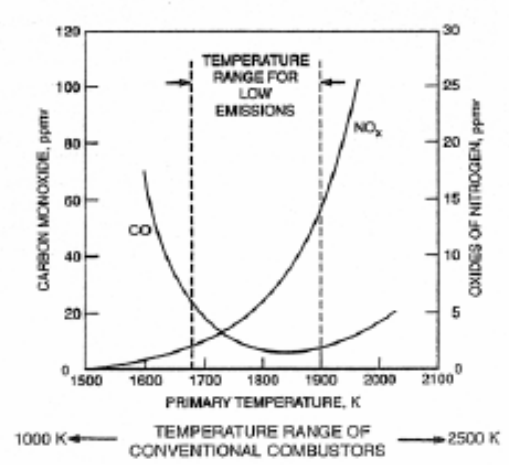
نوع آلاینده	غلظت (PPMV)	منبع
اکسید نیتریک (NO)	20-220	اکسیداسیون نیتروژن اتمسفر
دی اکسید نیتروژن (NO_2)	2-20	اکسیداسیون موجود در سوخت آلی
مونواکسید کربن (CO)	5-330	اکسیداسیون ناقص کربن سوخت
دی اکسید سولفور (SO_2)	0 -100	اکسیداسیون سولفور موجود در سوخت
تری اکسید سولفور (SO_3)	0 -4	اکسیداسیون سولفور موجود در سوخت
هیدرو کربن های نسوخته (UHC)	5-300	اکسیداسیون ناقص سوخت و واسطه ها

3- اصول تشکیل NOx ناشی از احتراق گاز طبیعی

مجموع آلاینده های NO و NO_2 را NOx می نامند. میزان انتشار آلاینده NOx در توربین های گازی که فاقد واحد کنترل NOx هستند نسبتاً زیاد (100-400 ppmv) می باشد. طبق قوانین EPA میزان مجاز انتشار NOx برای نیروگاه هایی که توان خروجی آنها بیش از 30 MW میباشد حدود 75 ppmv و برای سایر واحدها 150 ppmv می باشد. NOx درحین احتراق سوخت های هیدروکربنی از طریق مکانیزم های مختلف تولید می شود. در توربین های گازی پنج مکانیزم عمده برای تولید NOx وجود دارد که عبارتند از NOx حرارتی، NOx فوری، NOx ناشی از واکنش میانی N_2O ، NOx سوخت، NOx ناشی از سوختن مجدد. [2]

3-1- مکانیزم تولید NOx حرارتی

در احتراق مخلوط رقیق گاز طبیعی، NOx حرارتی و NOx ناشی از واکنش میانی N_2O از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می باشد. تشکیل NOx حرارتی به مقدار زیادی بستگی به دما دارد و نرخ تولید آن غیر خطی می باشد و با افزایش کم دما میزان NOx انتشار یافته بشدت افزایش می یابد. در شکل(1) افزایش نمایی تولید NOx برحسب دما نشان داده شده است.



شکل(1)- رابطه انتشار NOx و CO با دما

مکانیزم NOx حرارتی شامل سه واکنش می باشد.

$$N_2 + O \rightarrow NO + N \quad (1)$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (2)$$

$$N + OH \rightarrow NO + H \quad (3)$$

www.SID.ir

Archive of SID

واکنش های NOx حرارتی بسیار سریع تر (ظرف چند میلی ثانیه) اتفاق می افتد و وابستگی زیادی به دما، غلظت اتم های اکسیژن موجود و زمان اقامت دارد. از آنجایی که NOx حرارتی وابستگی نمایی به دما دارد بنابراین کاهش پیک دمای احتراق می تواند به کاهش انتشار NOx از توربین گاز کمک نماید. تغییر در اجزای سوخت می تواند باعث تغییر دمای آدیاباتیک شعله سوخت گردد که این امر نیز در میزان NOx خروجی تاثیر می گذارد. [2]

3-2- مکانیزم تولید NOx ناشی از واکنش میانی N_2O

در مورد مشعل های پیش آمیخته با هوای اضافی در توربین های گاز با دما و فشار بالا، واکنش N_2O یک مکانیزم مهم برای تشکیلNOx می باشد. این مکانیزم شامل حمله رادیکال های تشکیل شده در شعله بر مولکول N_2O می باشد که موجب تشکیل نیتروژن و اکسید نیتریک می شود.

$$O + N_2 + M \rightarrow N_2O + M \quad (4)$$

$$H + N_2O \rightarrow NO + NH \quad (5)$$

$$O + N_2O \rightarrow NO + NO \quad (6)$$

انتشار N_2O به تنهایی مهم نمی باشد اما N_2O در اثر یکسری واکنشهای میانی به اکسید نیتروژن تبدیل می شود. انتشار N_2O در ضریب تعادلی پایین (کمتر از 0/6) از اهمیت زیادی برخوردار می باشد که در اکثر محفظه های احتراق DLE رایج می باشد. [2]

3-3- مکانیزم تشکیلNOx فوری و NOx سوخت

NOx فوری طی واکنش سریع بین مولکولهای نیتروژن موجود در هوای احتراق با رادیکالهای هیدروکربنی موجود در سوخت بوجود می آید. NOx فوری در شعله بوجود می آید و معمولاً در مقایسه با NOx حرارتی بسیار ناچیز می باشد.

NOx سوخت نیز در اثر واکنش نیتروژن موجود در سوخت با اکسیژن هوا بوجود می آید و از آنجایی که غالباً سوخت گاز طبیعی دارای نیتروژن بسیار کمی می باشد تشکیل NOx سوخت بسیار ناچیز می باشد.[4]

3-4- مکانیزم تشکیل NO_2

در توربین های گازی مقدار کمی NO_2 در محفظه احتراق تشکیل می شود اما تبدیل NO به NO_2 می تواند پس از خروج گازهای تولیدی از محفظه احتراق رخ دهد. فرایند تبدیل غالباً در دمای پایین (1000-800 درجه کلوین) رخ می دهد و واکنش با هیدروکربن های نسوخته و CO به این فرایند کمک می نماید. پس از اینکه گازهای خروجی از محفظه احتراق خارج شدند برخی نقاط با دمای حدود 1000-800 ^oK وجود دارد که در یک دوره زمانی کوتاه برای تبدیل NO به NO_2 کافی می باشند. علاوه بر این وجود هیدروکربنهای سنگین موجب افزایش تمایل تبدیل NO به NO_2 و در نتیجه افزایش انتشار NO_2 می گردد.

چنانچه غلظت NO_2 از 10 ppm بیشتر باشد باعث ایجاد دود مرئی قهوه ای یا زردرنگ در دودکش می شود. به همین دلیل تشکیل NO_2 خصوصا تبدیل NO به NO_2 بدلیل حذف دود مرئی در نیروگاه ها در دهه اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفت.

توربین های گازی بدون سیستم کنترل ثانویه انتشار آلاینده که سوخت هایی با میزان بالایی از هیدروکربن های سنگین می سوزانند امکان انتشار دود مرئی NO_2 را دارند. در اکثر اوقات این مساله در حالت نیمه بار زمانی که راندمان احتراق پایین تر از راندمان پایه باشد اتفاق می افتد. پایین آمدن راندمان موجب می شود که هیدروکربن های نسوخته بیشتری از دودکش خارج شود و تبدیل NO به NO_2 افزایش یابد. با اینحال مثالهایی وجود دارد که در حالت بار پایه نیز دود مرئی ناشی از انتشار NO_2 دیده شده است. [2]

www.SID.ir

Archive of SID

تبدیل NO به NO_2 برای دو نیروگاه با دو توربین مشابه و با دونوع سوخت گازی مختلف که ترکیب درصد اجزای آنها در جدول(3) ارائه شده بررسی گردید.قابل ذکر است که هیچ یک از نیروگاه ها دارای واحد تصفیه نبودند و در نیروگاه ب از دودکش دود قهوه ای تقریباً ثابتی خارج می شد.

جدول(3)- ترکیب درصد اجزای گاز طبیعی دو نیروگاه مختلف با توربین های مشابه

اجزاء	ترکیب درصد	
	نیروگاه الف	نیروگاه ب
متان	95	89
اتان	2	8
پروپان	<1	2
C_4^+	<1	<1
نیتروژن	2	<1

بعد از بررسی تمام مواردی که می توانست موجب ایجاد دود در نیروگاه گردد، مشخص شد که اختلاف در کیفیت و ترکیب درصد سوخت ها می تواند دلیل این امر باشد. با فرض اینکه غلظت هیدروکربن نسوخته برای دو سوخت همگون باشد، در نیروگاه ب درصد تبدیل NO به NO_2 در محفظه احتراق بیشتر است و تولید کافی NO2 در این واحد موجب تشکیل دود مرئی می شود. در جدول (4) میزان NO_2 و درصد تبدیل NO_2 به NO برای این دو نیروگاه ارائه شده است.

علت دیگر تبدیل NO به NO_2 ناشی از حضور هیدروکربن های سنگین تر می باشد که برای حذف NOx ناشی از آن می توان از روش احیای کاتالیستی (SCR) استفاده نمود. تجهیزات SCR از آمونیاک و کاتالیست های احیایی برای حذف NOx از جریان خروجی توربین گاز استفاده می نماید. تحقیقات نشان داده است که این فرایند زمانی که نسبت NO_2 به NO تقریباً 1:1 می باشد موثرتر است.تولید NO_2 بیشتر در جریان خروجی می تواند به راندمان SCR آسیب برساند.

جدول (4)- درصدتبدیل NO_2 به NO و میزان NO_2 تولید شده در دو نیروگاه الف و ب

اجزاء	نیروگاه الف		نیروگاه ب	
	درصد تبدیل(٪)	غلظت NO_2 (PPM)	درصد تبدیل(٪)	غلظت NO_2 (PPM)
متان	35	8/75	32	8
اتان	<1	~0	25	6/25
پروپان	<1	~0	10	2/5
ایزو بوتان	<1	~0	<1	~0
نرمال بوتان	<1	~0	<1	~0
مجموع غلظت NO_2 (PPM)	8/75		16/75	

3- بحث و نتیجه گیری

- توربین های گازی جدید سیستم های احتراق بسیار پیچیده ای دارند که طراحی آنها بستگی به ترکیب درصد اجزای سوخت دارد بطوری که کیفیت مناسب سوخت موجب نگهداری قابل قبول دستگاه، افزایش طول عمر دستگاه و کاهش آلاینده ها می شود. تغییرات عمده در ترکیب درصد اجزای سوخت گاز طبیعی پس از یک مدت زمان کوتاه باعث وارد آمدن صدمات اساسی به تجهیزات می شود و برروی عملکرد توربین گاز اثر می گذارد و موجب کاهش طول عمر تجهیز و نیز کاهش قابلیت اطمینان تولید نیروی برق می شود.

www.SID.ir

Archive of SID

- اگرچه توربین های گازی می توانند در محدوده وسیعی از سوخت های گازی با ترکیب درصد اجزای مختلف عمل کنند اما آنها در حین نصب برای بازه کوچکی از تغییر ترکیب درصد اجزای سوخت گاز تنظیم می گردند و چنانچه تغییرات عمده ای در ترکیب درصد اجزای سوخت گاز رخ دهد، بمنظور پایین نگهداشتن میزان آلاینده ها و نیز ثابت نگهداشتن پایداری و میزان قابلیت اطمینان بایستی توربین مجدداً تنظیم گردد.
- در محفظه احتراق توربین های گازی یک رابطه جانشینی بین انتشار NOx و دینامیک احتراق وجود دارد. بطوری که تغییر در اجزای سوخت باعث شروع افزایش انتشار NOx می شود و بمنظور نگهداشتن میزان مجاز انتشار آلاینده ها، توربین گاز مجبور به تغییر در عملکردش می شود. این تغییرات عملکردی باعث کاهش طول عمر تجهیز و قابلیت اطمینان واحد می شود.
- افزایش ترکیب درصد هیدروکربن های سنگین تر در سوخت گاز طبیعی موجب موارد ذیل می گردد.

1- تغییر در خواص اساسی احتراق سوخت بویژه سرعت سوختن و خوداشتعالی اثر عمده ای برروی تبدیل NO به NO_2 دارد و احتمال تولید دود مرئی در واحدهای فاقد SCR بویژه در شرایط نیمه بار را افزایش می دهد.
2- یک تغییر نسبتاً کوچک در غلظت هیدروکربن های سنگین تر برای ایجاد این تغییرات کافی می باشد.
3- در توربین هایی که بمنظور کنترل NOx دارای سیستم SCR می باشد، افزایش NOx می تواند بر اثر کاهش راندمان کاتالیست یا افزایش آمونیاک باشد.
4- ضریب Wobbe برای مشخص نمودن قابلیت تغییر کیفیت سوخت گاز طبیعی در توربین های گازی کافی نیست. یک معیاری که تغییرات سرعت شعله و نسبت استوکیومتری سوخت و هوا را مشخص نماید جهت اطمینان حاصل نمودن از قابلیت تغییر کیفیت سوخت گاز طبیعی در توربین های گازی نیاز می باشد. اطلاعات و بررسی های بیشتری برای مشخص نمودن بازه های قابل قبول و مناسب تغییر کیفیت سوخت نیاز می باشد.

- سازندگان اصلی تجهیزات بایستی در گارانتی عملکرد دستگاه به بهترین کیفیت سوخت و میزان تغییرات مجاز در کیفیت سوخت بویژه هیدروکربن های سنگین تر اشاره نماید.

مراجع

1- Kurz , R., GAS TURBINE FUEL CONSIDERATIONS, GMC 2004
2- Nord, L. O., Anderson, H. G. Influence of variations in the natural gas properties on the combustion process in terms of emissions and pulsations for a heavy-duty gas turbine. Proceedings of International Joint Power Generation Conference 2003, June 16-19, Atlanta, Georgia, USA. IJPGC2003-40188.
3- Kurz R, GAS TURBINE PERFORMANCE, Thirty-Fourth Turbomachinery Symposium, 2005
4- Pavri, R., Moore, G. D., Gas Turbine Emissions and Control, GE Power Systems _ GER-4211
5- Odgers, J., Kretschmer, D. Gas Turbine Fuels and their Influence on Combustion. Kent: Abacus Press. 1986.

www.SID.ir