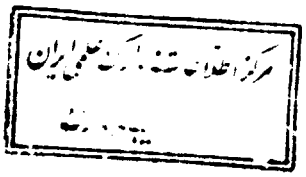
بسم الله الرحمن الرحيم

٣٠٠٨٧

۱۳۷۹ /۵/ ۲۱



دانشگاه علم و صنعت ایران
دانشکدهٔ مهندسی مکانیک

مطالعهٔ تأثیر دمای شعله در محفظه احتراق توربین‌های گاز صنعتی بر تولید NO_x

نگارش : حسن فروزانی

۷۱۶۹

پایان‌نامه جهت اخذ درجهٔ کارشناسی ارشد
در رشتهٔ مهندسی مکانیک
گرایش تبدیل انرژی

استاد راهنما : دکتر سید مصطفی حسینعلی‌پور

۳۰۰۵۱۷

بهمن ۱۳۷۸

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و کسانی که زندگیم از شمع وجودشان پرفروغ است

و کسانی که دوستشان دارم . . .

چکیده

توربین‌های گازی بعنوان سیستم‌های تولید قدرت در اشل صنعتی در کشورهای جهان از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. مسئله اثرات زیست محیطی محصولات احتراق این توربینها از بحث‌های روز مورد توجه در اشل تحقیقاتی و صنعتی می‌باشد. روشهای کاهش آلودگی بخصوص NO_x مسئله اصلی مورد مطالعه در تحقیق می‌باشد.

در این تحقیق در ابتدا بمنظور آگاهی از محصولات احتراق تحت شرایط کاری مختلف به مدلسازی احتراق پرداخته‌ایم. احتراق با استفاده از تقریب تعادل شیمیایی هیدروکربنها مدل شده است. بنابراین دمای آدیاباتیک شعله و غلظت محصولات احتراق از یک زیربرنامه محاسبه می‌شود. بعد از این مرحله آشنایی با مکانیسمهای تشکیل NO صورت می‌گیرد. NO حرارتی و موجود مورد بررسی و مدلسازی قرار می‌گیرند و فرض بر این است که احتراق در حالت استوکیومتریک رخ می‌دهد. NO حرارتی بر اساس مکانیسم زلدویچ پیشرفته و NO موجود بر اساس فرمولهای تجربی مدلسازی می‌شوند.

مکانیسم حرارتی شدیداً به دمای شعله وابسته است و مقدار زیادی از NO تولید شده در سیستمهای احتراق حاصل از این مکانیسم است. لذا یکی از راههایی که شدیداً می‌توان باعث کاهش NO در سیستمهای احتراق شد روش کاهش دمای شعله می‌باشد. این امر توسط راههای متفاوتی صورت می‌گیرد که یکی از آنها تزریق آب بدرون محفظه احتراق می‌باشد. آب تزریق شده بمانند یک چاه حرارتی عمل می‌کند و حرارت احتراق صرف تبخیر و فوق داغ شدن بخار آن می‌شود و در نهایت از افزایش بی‌رویه دمای شعله جلوگیری می‌کند. مدل تزریق آب برای یک محفظه احتراق لوله‌ای حلقوی صورت گرفته است و تأثیر آن بر روی مقدار تولید NO تحت شرایط کاری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

تقدیر و تشکر:

ضمن سپاس بیکران خداوند، بر خود لازم می‌دانم ازگروه مکانیک پژوهشگاه نیرو که امکانات پژوهشی جهت انجام یک پروژهٔ کاربردی را در اختیار اینجانب قرار داده تشکر نمایم. ضمناً از استاد محترم جناب آقای دکتر سیدمصطفی‌حسینعلی‌پور که با ارائه راهنمایی‌های مدبرانه و دلسوزانه خود، نظارت و سرپرستی این پروژه را به عهده داشتند ، صمیمانه قدردانی می‌نمایم. همچنین از اعضای هیات داوری بخاطر حضور در جلسهٔ دفاعیه و فراهم نمودن امکان ارائه پربار آن، صمیمانه تشکر نموده و سپاس خود را به حضورشان تقدیم می‌دارم.

بهمن ۱۳۷۸

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول : پیشگفتار

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- NO_x و تأثیرات آن ۲

۱-۳- هدف از انجام پروژه ۵

۱-۴- تاریخچه ۷

۱-۵- خلاصهٔ مطالب ۸

فصل دوم : احتراق و مکانیسمهای تشکیل NO_x

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۱-۱- معادلهٔ حالت ۱۱

۲-۱-۲- مخلوطهای گاز ایده‌آل ۱۱

۲-۱-۳- قانون اول ترمودینامیک ۱۲

۲-۲- مشخصه‌های اصلی فرآیند احتراق ۱۴

۲-۲-۱- احتراق استوکیومتری ۱۴

۲-۲-۲- نسبت اکیوالانس ۱۵

۲-۲-۳- انتالپی مطلق و انتالپی تشکیل ۱۶

۲-۲-۴- انتالپی احتراق و مقادیر گرمایی ۱۷

۲-۲-۵- دمای آدیاباتیک شعله ۱۹

۲-۳- تعادل شیمیایی و مدل ریاضی آن ۲۱

۲-۳-۱- تابع گیبس ۲۱

۲-۳-۲- سیستمهای پیچیده ۲۳

۲-۳-۳- بررسی احتراق یک سیستم $C-H-N-O$ در حال تعادل ۲۴

۲-۳-۴- تأثیر فشار بر روی احتراق ۲۵

۲-۳-۵- مدل ریاضی احتراق ۲۷

۲-۳-۶- عوامل مؤثر بر دمای آدیاباتیک شعله ۳۰

۲-۴- احتراق و NO_x ۳۳
۲-۴-۱- مکانیسمهای تشکیل NO_x ۳۴
- مکانیسم زلدویچ پیشرفته (حرارتی) ۳۴
- تعادل شیمیایی و NO حرارتی ۳۶
- مکانیسمهای سریع ۳۷
- مکانیسم سوخت - نیتروژن ۴۰
۲-۴-۲- مقایسهٔ اجمالی مکانیسم های تشکیل NO ۴۱

فصل سوم : روشهای کاهش NO_x در احتراق توربینهای گازی

۳-۱- مقدمه ۴۲

۳-۲- استراتژیهای کاهش NO_X ۴۴
۳-۲-۱- اصلاح احتراق ۴۷
- هوای اضافی پایین (*Low Exess air*) ۴۷
- احتراق مرحله‌ای (*Staged combustion*) ۴۸
- کاهش دما (*Temperature Reduction*) ۵۰
- مشعلهای NO_x - پایین (*Low - NO_x burners*) ۵۱
- احتراق گاز/ اکسیژن (*Oxy / gas combustion*) ۵۳
- بازسوزی (*Reburn*) ۵۳
۳-۲-۲- کنترلهای بعد از احتراق ۵۴
- روش کاهش بدون کاتالیزور ۵۴
- روش کاهش با استفاده از کاتالیزور ۵۴

۳-۳- کاهش NO_x توسط تزریق آب یا بخار ۵۵
۳-۳-۱- مدل فیزیکی محفظهٔ احتراق ۵۹
- ناحیهٔ اولیه ۶۱
- ناحیهٔ میانی ۶۱
- ناحیهٔ رقیق‌سازی ۶۲
۳-۳-۲- مدل احتراق بکار رفته در مدل‌سازی تخمین تولید NO_x ۶۲
۳-۳-۳- مدلی جهت تخمین NO_x ۶۴

- فرضیات مدل تخمین NO_x ۶۵
- NO حرارتی ۶۵
- NO موجود ۶۶
۳-۳-۴- تأثیر تزریق آب بر روی راندمان سیستم ۶۷

فصل چهارم : نتایج و پیشنهادات

۴-۱- مقدمه ۶۹
۴-۲- مدل احتراق ۷۰
۴-۳- مدل تزریق آب ۷۴
۴-۴- مدل تخمین NO ۷۵
۴-۵- مدل کاهش NO ۷۷
۴-۶- بحث و نتیجه‌گیری ۸۶
۴-۷- پیشنهادات ۸۷

ضمیمه الف - فلوچارت برنامهٔ محاسبهٔ دمای شعله و محصولات احتراق ۸۹
ضمیمه ب - اثبات معادلهٔ سینتیک شیمیایی مکانیسم حرارتی ۹۰
منابع و مراجع ۹۲

فهرست تصاویر

عنوان | صفحه

فصل اول

۱-۱ پیشرفت تخریب ازن در بالای ناحیه‌ای از قطب شمال ۴

فصل دوم

۲-۱ نمایی از یک سیستم جرم ثابت و یک حجم کنترل با مرز ثابت ۱۲

۲-۲ نمای گرافیکی انتالپی مطلق ، انتالپی تشکیل و انتالپی محسوس ۱۷

۲-۳ یک راکتور جریان پایدار ۱۸

۲-۴ انتالپی محصولات و واکنشگرها در مخلوط استوکیومتریک هوا - متان ۱۸

۲-۵ دمای آدیاباتیک شعله در فشار ثابت ۲۰

۲-۶ محصولات فرعی حاصل از احتراق پروپان و هوا ۲۶

۲-۷ دمای آدیاباتیک شعله و محصولات اصلی حاصل از احتراق پروپان و هوا ۲۷

۲-۸ محصولات فرعی حاصل از احتراق پروپان با استفاده از کد ضمیمه ۳۱

۲-۹ محصولات اصلی حاصل از احتراق پروپان با استفاده از کد ضمیمه ۳۱

۲-۱۰ تأثیر تغییرات دمای هوای ورودی و نسبت اکیوالانس بر دمای آدیاباتیک شعله با استفاده از کد ضمیمه ۳۲

۲-۱۱ تأثیر تغییرات فشار و نسبت اکیوالانس بر دمای آدیاباتیک شعله با استفاده از کد ضمیمه ۳۲

۲-۱۲ پروفیلهای غلظت - زمان در محاسبات سینتیکی واکنش متان - هوا ۳۷

۲-۱۳ NO موجود بر حسب تابعی از نسبت اکیوالانس ۳۹

۲-۱۴ دیاگرام مسیر واکنشهای تشکیل NO موجود و سوخت ۴۱

فصل سوم

۳-۱ تکنولوژی کاهش NO_x در تجهیزات احتراق صنعتی گازسوز ۴۶

۳-۲ غلظت NO_x بر حسب نسبت اکیوالانس در یک موتور اشتعال جرقه‌ای ۴۷

۳-۳ محفظه احتراق دو مرحله‌ای برای توربین‌های گازی NO_x پایین ۴۸

۴-۳ تشریح گرافیکی محفظه احتراق RQL ۴۹
۵-۳ شماتیک یک محفظه احتراق RQL ۴۹
۶-۳ تأثیر بازگشت گازهای خروجی بر روی NO_x ۵۱
۷-۳ شماتیک دیاگرام یک محفظه احتراق با بازگشت گازهای خروجی ۵۱
۸-۳ مشعل NO_x پایین با احتراق فقیر - غنی ۵۲
۹-۳ مشعل NO_x پایین با احتراق غنی - فقیر ۵۲
۱۰-۳ بویلر صنعتی مجهز به سیستم بازسوزی ۵۳
۱۱-۳ کاهش NO_x توسط روشهای کنترل بدون کاتالیزور ۵۵
۱۲-۳ وابستگی شدید تولید NO و افزایش دما ۵۶
۱۳-۳ شماتیک تزریق در محفظهٔ احتراق ۵۷
۱۴-۳ نازل سوخت یک محفظه احتراق NO_x پایین با استفاده از تزریق آب ۵۷
۱۵-۳ تأثیر تزریق آب بر آلودگیهای CO و NO_x در توربینهای گازی بزرگ ۵۸
۱۶-۳ استفاده از تزریق بخار در کنار روشهای کنترلی جهت کاهش NO_x در یک سیکل ترکیبی ۵۹
۱۷-۳ اجزاء و نواحی مختلف محفظه احتراق توربین گاز ۶۰
۱۸-۳ الگوی جریان در ناحیهٔ اولیه محفظه احتراق ۶۱
۱۹-۳ الگوی جریان در نواحی مختلف محفظه احتراق ۶۲
۲۰-۳ الگوی احتراق در مدل تخمین تولید NO_x ۶۳
۲۱-۳ شماتیکی از یک توربین گاز با تزریق آب ۶۸

فصل چهارم :

۱-۴ نمایش محصولات اصلی احتراق متان ۷۲
۲-۴ نمایش محصولات فرعی احتراق متان ۷۲
۳-۴ نمایش دمای آدیاباتیک شعله در احتراق متان ۷۳
۴-۴ مقایسه NO و NO_2 حاصل از احتراق متان ۷۴

۴-۵ تزریق آب و تأثیر آن بر دمای آدیاباتیک شعله ۷۵
۴-۶ تشکیل *NO* حرارتی بر حسب زمان اقامت مؤثر ۷۷
۴-۷ مقایسه بین نتایج حاصل از مدل و داده‌های آزمایشگاهی ۷۸
۴-۸ مقایسه بین نتایج حاصل از مدل و داده‌های آزمایشگاهی ۷۹
۴-۹ تشکیل *NO* حرارتی بر حسب دما آدیاباتیک شعله در احتراق متان ۷۹
۴-۱۰ کاهش *NO* در احتراق متان و مقایسه چند سوخت نمونه ۸۰
۴-۱۱ تأثیر زمان اقامت بر تولید *NO* ۸۱
۴-۱۲ تأثیر تغییر فشار بر تولید *NO* ۸۱
۴-۱۳ تأثیرات تغییر فشار و تزریق آب بر تولید *NO* ۸۲
۴-۱۴ تغییرات دمای گاز ورودی به توربین همراه با تغییرات *NO* در اثر تزریق آب ۸۳
۴-۱۵ کاهش راندمان حرارتی در اثر تزریق آب ۸۳
۴-۱۶ تأثیر تزریق آب بر تولید *CO* ۸۴
۴-۱۷ تأثیر دمای جریان هوای ورودی بر روی تولید *NO* ۸۵
۴-۱۸ تأثیر تزریق آب بر روی *NO* ، *CO* و راندمان حرارتی سیکل توربین گاز ۸۶

فهرست جداول

عنوان — صفحه

فصل دوم

۲-۱ خواص چند سوخت نمونه در دمای K ۲۹۸ و فشار atm ۱ ..... ۱۵

۲-۲ درجات تجزیه در احتراق پروپان - هوا ۲۴

فصل سوم

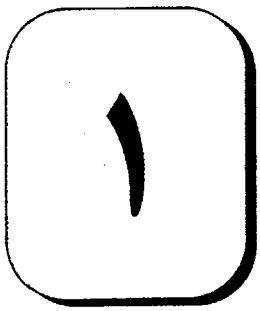
۳-۱ اکسیدهای نیتروژن ۴۳

فصل چهارم :

۴-۱ واکنشهای مختلف مدل محفظه احتراق ۷۷

فصل اول

پیشگفتار



۱-۱- مقدمه

برای اولین بار در اواسط سال ۱۹۴۰ در لوس‌آنجلس علائمی مشاهده گردید که بعداً معلوم گردید که در اثر آلودگی هوای فتوشیمیایی بوده است. محققین متعددی دریافتند که شرایط در منطقهٔ لوس‌آنجلس نوع جدیدی از مه دودی بوده که در اثر عمل نور خورشید بر روی اکسیدهای نیتروژن و واکنش‌های بعدی با هیدروکربنها به وجود می‌آیند. این مه دود با شرایطی که در اوایل این قرن در لندن و فاجعهٔ مربوط به هوای آلوده شده‌ایکه در *Donora* و *Pennsylvania* رخ داده بود فرق داشت. در حالت‌های اخیر ذرات ریز و اکسیدهای حاصله از سوختن زغال‌سنگ شرایط ناسالم و خطرناکی را به وجود آوردند. در لوس‌آنجلس به سهولت آشکار شد که منبع اصلی اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربنهای حاصل از سوخت ، اتومبیلها بوده‌اند[۱].

علائم آلودگی زیست محیطی باعث بروز نگرانی در تمام جهان گردید و حساسیت خیلی زیاد به شرایط محیط زیست وقتی بالا گرفت که هواپیماهای مافوق صوت به عنوان قسمتی از وسایل حمل و نقل هوایی مورد استفاده قرار گرفتند. سئوالاتی نظیر تأثیر بخار آب پاشیده شده از موتورهای هواپیماهای فوق بر استراتوسفر ، مطرح گردید. این نظریه منجر به بررسی اثرات تزریق مقادیر زیادی از گونه‌های مختلف در موازنه اُزن در استراتوسفر شد. جالب است که در حال حاضر نیز گونه‌های

عمده‌ایکه تصور می‌رود در موازنه اُزن تأثیر می‌نمایند اکسیدهای نیتروژن می‌باشند. در مورد اتومبیلها و نیروگاهها و موتورهای جت ، مقدار مواد خروجی ، بویژه اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربنها را می‌توان کاهش داد و توسط محققین راههای متفاوتی جهت این امر پیشنهاد شده است.

۱-۲- NOx و تأثیرات آن

اکسیدهای نیتروژن (NOx) یکی از محصولات فرعی احتراق سوختهای فسیلی (مانند نفت) و زغال و گاز طبیعی می‌باشد. NOx در احتراق با دمای بالا در موتورها و بویلرهای صنعتی و توربین‌های گازی تولید می‌شود. دمای بالا باعث می‌شود که گاز بی‌خطر نیتروژن تجزیه شود و با اکسیژن ترکیب شود و به شکل یک آلوده کننده خطرناک مانند NOxها درآید. اکسیدهای نیتروژن به شکلهای متفاوتی در طبیعت وجود دارند که برخی از آنها عبارتند از اکسید نیتریک NO ، اکسید نیتروس N_2O ، تری اکسید نیتروژن NO_3 ، آن‌هیدرید نیتریک N_2O_5 و آن‌هیدرید نیتروس N_2O_3. از بین این اشکال فقط NO و NO_2 بطور قابل توجهی مصنوعاً بوجود می‌آیند که بطور مشترک به این دو NO_x اطلاق می‌گردد[۲].

آلوده‌کننده‌های اولیه هوا که مستقیماً از منابع صادر می‌شوند و آلوده‌کننده‌های ثانویه ، که از واکنشهای شیمیایی بوجود می‌آیند ، به راههای متفاوتی بر روی محیط زیست و سلامتی انسان تأثیر می‌گذارند. تأثیرات آلوده‌کننده‌ها را به چهار دستهٔ متفاوت می‌توان تقسیم کرد.

۱- تغییر دادن خواص جوی و آلوده‌کردن بارندگیها

۲- صدمه رساندن به رشد و نمو گیاهان

۳- فساد زودرس مواد

۴- افزایش بالقوه بیماری و مرگ‌ومیر در انسان

NO در اتمسفر با یک فرآیند فتوشیمیایی در حضور نور خورشید و مواد آلی سریعاً به NO_2 اکسید می‌شود. NO_2 خیلی بیشتر از NO برای سلامتی انسان مضر است و بعنوان دشمنی برای

هموگلوبینهایی که حاوی اکسیژن برای بافتهای مختلف بدن هستند ، محسوب می‌شود زیرا اکسیژن را از آنها می‌گیرد و در ریه‌ها به شکل اسید درمی‌آید و بنابراین در غلظت یکسان از CO خیلی خطرناکتر و زهرآگین‌تر می‌باشد. همچنین دید اتمسفری را از بین می‌برد و اتمسفر را شبیه مه دودآلود می‌سازد. زمانیکه غلظت آن به بیش از ppm ۰/۴ برسد افراد قادرند NO_2 را بوسیله بوی آن تشخیص دهند. اگر فردی بطور مداوم در معرض ۰/۰۶ تا ppm ۰/۱ NO_2 قرار داشته باشد به بیماریهای ریوی و تنفسی مبتلا می‌گردد. حتی اگر چند دقیقه کوتاه در معرض ۱۵۰ تا ppm ۲۰۰ NO_2 قرار بگیرد ، باعث تخریب نایچهٔ وی می‌شود و اگر چند دقیقه در معرض بیش از ppm ۵۰۰ قرار بگیرد آب در بافتهای بدن وی بشدت ذخیره خواهد شد[۲].

- در قسمت پایین جو ، NOx با ترکیبات آلی فرار در حضور نور خورشید ترکیب می‌شود و از عوامل اصلی مه دودآلود درون شهرها بشمار می‌آید. در قسمت بالایی جو ، NOx بصورت یک پیشرو با دیگر گازها در تخریب لایهٔ حفاظتی اُزن که محافظ زمین در برابر اشعه‌های مضر ماوراء بنفش می‌باشد ، عمل می‌کند.

NOx بصورت یک عامل عمده ، باعث ایجاد مسائل تنفسی برای جوانان ، افراد پا به سن گذاشته ، آنهایی که بیماریهای ریوی دارند و مردمی که در طول هر روزه با غلظت بالایی از آن سروکار دارند ، می‌شود. محققین دریافته‌اند که مردان و زنان غیر سیگاری که در ناحیه‌ای با اُزن نسبی بالا و دیگر آلوده‌کننده‌های هوا زندگی می‌کنند ، حدود ۵۰ تا ۷۵ درصد از مضرات ریوی یک فرد سیگاری را دارا هستند. بچه‌هایی که با بیماری تنگی نفس روبرو هستند بشدت تحت تأثیر اُزن قرار می‌گیرند ، و مطالعات نشان داده‌اند که اُزن باعث تورم راه تنفسی بچه‌های سالم و نرمال می‌شود. در بافتهای بدن افراد بالغی که به میزان زیادی در معرض اُزن قرار می‌گیرند هوا حضور پیدا کرده و خطر بروز برنشیت مزمن را بالا می‌باشد[۳].

NOx در توانایی گیاهان جهت تولید و انبار مواد غذایی بی‌تأثیر نیست و تولید محصولات کشاورزی مانند گندم و کتان و دانه‌های سویا ، را کاهش می‌دهد. NOx با آلاینده‌های دیگری چون اکسیدهای گوگرد که از محصولات اصلی سوخت زغال می‌باشد ، ترکیب می‌شود و به شکل بارانهای