

بررسی تجربی تأثیر رقیق‌سازی سوخت با رقیق‌کننده CO₂ بر تشکیل آلاینده‌ها در شعله غیرپیش‌آمیخته پروپان - هوا

محمد محمودی آریا^۱، کارشناس ارشد، افشین فهیمی راد^۲، کارشناس ارشد، حمید م مهدی هروی^{۳*}، استادیار

^۱ گروه مکانیک- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد مشهد

mohammad.arya62@gmail.com

^۲ گروه مکانیک- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد مشهد

afshin_fahimi_rad@gmail.com

^۳ گروه مکانیک- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد مشهد

heravimh@mshdiau.ac.ir

دریافت مقاله: ۹۰/۳/۹ اصلاحیه: ۹۰/۷/۲۰

پذیرش نهایی: ۹۰/۱۱/۱۵

چکیده: به دلیل نقش اساسی اکسیدهای نیتروژن (NO_x) در تخریب لایه ازن، تشکیل باران‌های اسیدی و همچنین مه‌دود فتوشیمیایی، کنترل تولید اکسیدهای نیتروژن یکی از مسائل کلیدی در طراحی سیستم‌های احتراقی محسوب می‌شود. اکسید نیتروژن (NO) (که مهمترین مکانیزم آن NO حرارتی می‌باشد)، بخش عمده آلاینده NO_x است. به علت حساسیت مکانیزم تشکیل NO حرارتی به دما، کاهش دمای شعله، یک راه حل علمی و عملی برای محدود کردن شکل‌گیری آن به حساب می‌آید. رقیق‌سازی سوخت، یکی از روش‌های کاهش دمای محفظه احتراق و در نتیجه، کاهش تشکیل NO حرارتی است. هدف از تحقیق حاضر، مطالعه آزمایشگاهی تأثیر رقیق‌کننده CO₂ بر تشکیل آلاینده NO_x در شعله غیرپیش‌آمیخته پروپان - هوا در یک محفظه احتراق است. نتایج آزمایشگاهی با ساخت کوره‌ای با محفظه احتراق استوانه‌ای که دارای تقارن محوری می‌باشد، به دست آمده است. آزمایش‌ها برای مقادیر مختلف نسبت هم‌ارزی از ۰/۷ تا ۱/۳ و دامنه وسیعی از نسبت‌های رقیق‌سازی انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت رقیق‌سازی، حداکثر دمای شعله در محفظه احتراق، و تشکیل آلاینده NO_x به طور متوسط تقریباً ۷۰٪ کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: NO_x، رقیق‌سازی، محفظه احتراق، نسبت رقیق‌سازی.

۱. مقدمه

از زمان کشف آتش تاکنون، آلودگی هوا همواره تهدیدی جدی برای بشر به حساب آمده و در دوره‌های مختلف به جنبه‌های متفاوتی از آن اهمیت داده شده است. آلودگی از منظر ایجاد بیماری‌های خطرناک در مقیاس‌های کوچک نظیر شهرها مورد توجه بوده، و از دیدگاه جهانی به لحاظ آثار سوء بر محیط زیست و مسائلی چون تخریب لایه ازن، باران‌های اسیدی، گرمایش زمین و پیامدهای آن بر اکوسیستم و در نهایت انسان، مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. منشأ آلودگی هوا در اوایل انقلاب صنعتی، عمدتاً صنایع و سوخت زغالسنگ بود، ولی امروزه منشأ آن در شهرها حمل و نقل درون شهری است. کاربرد سوخت‌های فسیلی در حمل و نقل و صنعت از یک سو، و فرآیندهای صنعتی با مصرف مواد خام و محصولات تولیدی آن‌ها از سوی دیگر، از عوامل عمده آلودگی‌های ساخته دست بشر محسوب می‌شوند [۱].

۲. آلاینده NO_x و مکانیزم‌های تشکیل آن

احتراق سوخت‌های فسیلی منجر به تولید آلودگی‌های قابل ملاحظه و در نهایت، گرم شدن زمین می‌شود. علت این امر، تشکیل آلاینده‌هایی از قبیل NO_x، SO_x، CO₂ و CO است [۲]. هنگامی که سوخت‌های فسیلی از قبیل گاز طبیعی، نفت و یا ترکیبات مشتق از آن‌ها در هوا می‌سوزند، محصولات اکسیداسیون شامل CO₂، CO و H₂O تشکیل می‌شوند. همچنین مولکول نیتروژن موجود در هوا با برخی از مولکول‌های اکسیژن موجود در آن، واکنش می‌دهد و اکسیدهای نیتروژن شکل می‌گیرند [۳]. مهم‌ترین اکسیدهای نیتروژن شامل اکسید نیتروس (N₂O)، دی اکسید نیتروژن (NO₂) و اکسید نیتریک (NO) هستند که مجموع NO و NO₂ به عنوان NO_x شناخته می‌شود [۴].

از بین اکسیدهای مختلف نیتروژن، NO و NO₂ به لحاظ آثار سوء بر سلامت انسان و N₂O نیز به عنوان یک گاز گلخانه‌ای که سبب پدیده گرمایش زمین می‌شود، بیشتر اهمیت دارند.

NO در فرآیند احتراق از ترکیب نیتروژن و اکسیژن هوا در درجه حرارت بالا و به‌خصوص در موتورهای احتراق داخلی تشکیل، و پس از ورود به هوا به سرعت به NO₂ تبدیل می‌شود [۵]. آلودگی ناشی از اکسیدهای نیتروژن، آثار زیان‌باری بر سلامت انسان و محیط زیست بر جای می‌گذارد که از آن جمله می‌توان به نقش مهم آن‌ها در تشکیل باران‌های اسیدی، مه‌دود فتوشیمیایی و

تخریب لایه ازن اشاره کرد [۶].

فرآیندهای مربوط به تشکیل و کاهش NO_x بسیار پیچیده، و مدل‌سازی جامع آن‌ها در سیستم‌های احتراقی نیازمند شبیه‌سازی جریان مغشوش و سینتیک‌های شیمیایی است. صدها واکنش اولیه برای توصیف کامل واکنش NO_x در سیستم‌های احتراقی مورد نیاز است. در چند دهه اخیر، محققان زیادی در شناخت دقیق و کامل انواع مکانیزم‌های مؤثر بر شکل‌گیری و مصرف NO و سهم هریک از آن‌ها در انواع فرآیندهای احتراقی تلاش کرده‌اند. بوومن و میلر [۷] یک مکانیزم کامل متشکل از ۲۳۴ واکنش برای سینتیک شیمیایی نیتروژن در نظر گرفتند و سپس با استفاده از روش‌های آنالیز حساسیت به توصیف مسیرهای اصلی تشکیل NO پرداختند. بر این اساس به طور عمده، سه مکانیزم برای تولید NO_x در احتراق سوخت‌های گازی مطرح است: مکانیزم NO گرمایی (حرارتی یا زلدوویچ)، مکانیزم NO فوری (پرامپت) و مکانیزم NO سوخت. مونیر و کاراواهو [۸] نیز به مطالعه تشکیل و مصرف NO در شعله‌های چرخشی پروپان - هوا به کمک مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی پرداختند.

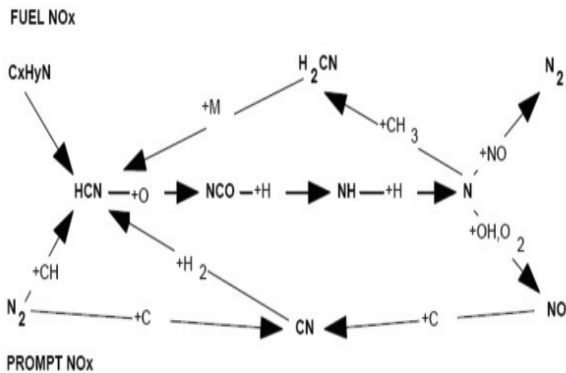
مکانیزم NO گرمایی، مهم‌ترین مکانیزمی است که تاکنون شناخته شده است. این مکانیزم برای اولین بار توسط زلدوویچ در سال ۱۹۴۶ مطرح شد. دما و غلظت بالای اکسیژن از عوامل مهم این مکانیزم و اکثر فرآیندهای احتراقی دیگر است. این مکانیزم توسط سه واکنش اساسی زیر، تحت عنوان مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته بیان می‌گردد [۹]:



تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مولکول نیتروژن N₂ نیازمند شکسته شدن پیوند قوی بین اتم‌های نیتروژن است و همین امر موجب وابستگی شدید این مکانیزم به درجه حرارت می‌گردد. این واکنش‌ها، واکنش‌های تشکیل NO حرارتی نیز نامیده می‌شوند، زیرا واکنش (۱-الف) به علت پیوند سه‌گانه قوی در مولکول N₂ دارای انرژی فعال‌سازی بسیار بالایی است، لذا فقط در دماهای بالا واکنش سریع انجام می‌گیرد؛ در غیر این صورت، واکنش اول، محدود کننده تشکیل NO حرارتی است. برای محاسبه غلظت NO حرارتی از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۱۰]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = K_1 \exp\left(\frac{-K_2}{T}\right) [N_2] [O_2]^{\frac{1}{2}} \cdot t \quad (2)$$

مکانیزم‌های تشکیل NO فوری و NO سوخت، پس از واکنش‌های راه‌اندازی به طور یکسان پیش می‌روند. مراحل اصلی این دو مکانیزم در شکل (۱) نشان داده شده است [۷].



شکل (۱): مراحل تشکیل NO فوری و NO سوخت

۳. روش‌های کنترل و کاهش تشکیل NO_x

با معرفی اجمالی آلاینده‌های شکل گرفته طی فرآیند احتراق و آثار مخربی که بر جای می‌گذارند، به کار بستن تمهیداتی برای به حداقل رساندن آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

به طور کلی، سه روش برای کنترل و کاهش آلاینده‌ها مطرح شده است [۱۵]:

(۱) روش پیش‌گیرانه شامل تحقیق و بررسی بر روی ترکیبات سوخت قبل از استفاده به عنوان واکنش‌دهنده در احتراق و تلاش برای کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق آن‌ها.

(۲) روش اولیه شامل تحقیق بر روی فرآیند احتراق و تجهیزات احتراق مانند مشعل و اجزای آن. این روش شامل روش‌های کنترل فرآیند احتراق است که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش هوای اضافی، احتراق مرحله‌ای، تزریق آب/بخار، تزریق رقیق‌کننده و باز چرخش گازهای خروجی (FGR) اشاره کرد.

(۳) روش ثانویه شامل اعمال راه‌کاری اصلاحی بر روی گازهای حاصل از احتراق و تفکیک و انحلال ذرات آلاینده تشکیل شده قبل از انتشار در هوا. روش اصلاحی بر روی جریان گاز خروجی شامل استفاده از مبدل‌های کاتالستی است.

نیاز روزافزون جهان به انرژی، محدود بودن و کاهش سریع سوخت‌های فسیلی از یک سو، و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از احتراق این سوخت‌ها از سوی دیگر، موجب شده طراحی وسایل احتراقی تمیز و با راندمان بالا و همچنین اعمال تمهیداتی برای کنترل و کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق آن‌ها، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و طراحان سیستم‌های احتراق قرار گیرد.

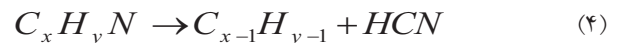
در این رابطه، K₁ و K₂ ثابت‌های سینتیکی واکنش، t زمان و T دما، و گروه نشان دهنده غلظت است.

به دلیل اینکه دمای بالای شعله سبب شکستن پیوند سه‌گانه مولکول نیتروژن موجود در هوا و ترکیب آن با اکسیژن موجود در آن می‌شود، تولید NO حرارتی به شدت به دما حساس است. در معادله تشکیل NO، دما به صورت تابع نمایی نقش دارد و از آنجا که در دماهای بالاتر از ۱۷۰۰ کلین به ازای هر ۴۰ درجه افزایش دما، تولید NO دو برابر می‌شود، همچنین به دلیل انرژی فعال‌سازی بالای مکانیزم تشکیل NO، اگر روشی موجب کاهش دمای شعله شود، عاملی مؤثر در کاهش تشکیل NO_x است [۱۱ و ۱۲].

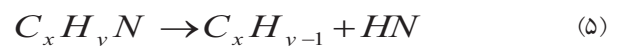
اثر غیرمستقیم اکسیدهای نیتروژن را نیز می‌توان تولید ترکیبات فتوشیمیایی ازن دانست که مکانیزم تشکیل آن به صورت زیر است [۱۳]:



NO سوخت، از طریق اکسیداسیون ترکیبات نیتروژن‌دار سوخت در ناحیه شعله تشکیل می‌شود و تولید آن هنگامی که میزان نیتروژن در سوخت بیش از ۰/۱ وزن سوخت باشد، چشمگیر است. مکانیزم NO سوخت با تجزیه مولکول سوخت در ناحیه شعله به شکل زیر آغاز می‌شود [۶]:



و یا:



مکانیزم NO فوری نیز در سال ۱۹۷۱ توسط فیلمور مطرح شد [۱۴]. این مکانیزم در اثر برخورد بین مولکول‌های نیتروژن و رادیکال‌های هیدروکربن به وجود می‌آید، لذا در احتراق سوخت‌های هیدروکربنی مطرح است. تشکیل این اکسید اساساً به غلظت رادیکال در ناحیه اول شعله وابسته است، و در شعله‌های اکسید شده (احتراق با اکسیژن اضافی)، سهم ناچیزی دارد. در صورتی که سهم آن در مخلوط‌های پرسوخت و دمای پایین ممکن است به ۲۵ درصد کل اکسیدهای نیتریک برسد. واکنش‌های اصلی مولکول نیتروژن با رادیکال هیدروکربن به صورت زیر است:



و



مؤثرند، ولی رقیق‌کننده CO₂ به دلیل داشتن ظرفیت حرارتی بالاتر در مقایسه با N₂ در کاهش NO_x مؤثرتر است.

در سال ۲۰۰۶، دانیل ای گیلز و همکاران [۲۲]، بر روی رقیق‌سازی مخلوط‌های گازی CO ۵۰٪ / H₂ ۵۰٪ و CH₄ ۱۰٪ / CO ۴۵٪ / H₂ ۴۵٪ با استفاده از رقیق‌کننده‌های H₂O، N₂ و CO₂ تحقیقاتی را انجام دادند. کارآمدی این رقیق‌کننده‌ها بر حسب توانایی آن‌ها در کاهش انتشار آلاینده NO_x از شعله‌های مخلوط گازی مشخص می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در عین حالی که هر سه رقیق‌کننده در کاهش انتشار آلاینده NO_x از شعله‌های این مخلوط‌های گازی مؤثرند، اما CO₂ و H₂O در مقایسه با N₂ رقیق‌کننده کارآمدتری هستند. همچنین مشخص شد که H₂O (بر حسب جرم)، رقیق‌کننده مؤثرتری نسبت به CO₂ و N₂ در کاهش انتشار آلاینده NO_x در این مخلوط‌های گازی به حساب می‌آید.

پارک و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۰۸، بر روی تأثیر افزودن CO₂ بر شعله‌پخشی متان آزمایش‌هایی را انجام دادند. نتایج تحقیقات نشان داد که افزودن CO₂ به علت اثرهای شیمیایی و گرمایی، باعث کاهش دمای شعله می‌شود.

در سال ۲۰۰۸ کومار و میسرا [۲۴]، بر روی رقیق‌سازی جت‌پخشی شعله LPG (شامل ۶۹٪ برحسب درصد حجمی) C₃H₈ و ۳۰٪ C₄H₁₀ و مابقی گازهایی که به عنوان سوخت در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است) با رقیق‌کننده N₂ تحقیقاتی انجام دادند. نتایج نشان داد که طول شعله با افزودن رقیق‌کننده بی‌اثر N₂ به علت کاهش ضریب پخش در اثر کاهش دمای شعله، زیاد می‌شود. شاخص انتشار NO_x و CO₂ با افزودن N₂، به طور یکنواخت کاهش می‌یابد.

در پژوهش‌های قبلی، آزمایش‌ها بر روی دامنه محدودی از نسبت‌های هم‌ارزی و رقیق‌سازی صورت گرفته است. در تحقیق حاضر، تأثیر رقیق‌سازی بر تشکیل آلاینده NO_x در احتراق غیرپیش‌آمیخته پروپان - هوای رقیق شده با رقیق‌کننده CO₂، در محدوده وسیع‌تری از نسبت‌های هم‌ارزی و رقیق‌سازی بررسی شده، و به منظور تعیین میزان اثربخشی رقیق‌سازی بر انتشار آلاینده NO_x، یک کوره آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

۴. دستگاه آزمایشگاهی

بدنه اصلی محفظه احتراق کوره آزمایشگاهی مورد استفاده، از لوله فولادی AISI 316 توخالی به قطر ۱۰۵ میلی‌متر و طول ۱۰۰۰ میلی‌متر با قابلیت

اعمال فرآیندهای حین احتراقی مانند رقیق‌سازی از راه‌کارهای مهم در کاهش دمای محفظه احتراق و در نتیجه کاهش آلاینده NO_x به حساب می‌آید. این روش، بر پایه گسترش حدود اشتعال‌پذیری به سمت شرایط کم‌سوخت استوار است که کاهش قابل توجه اکسیدهای نیتروژن را به همراه دارد. رقیق‌سازی، روشی است که با افزودن یک رقیق‌کننده با ظرفیت حرارتی بالا، ظرفیت حرارتی مخلوط را افزایش، و با پایین آوردن دمای محفظه احتراق، انتشار آلاینده NO_x را کاهش می‌دهد [۱۶]. از جمله رقیق‌کننده‌هایی که سبب رقیق‌سازی مخلوط سوخت و هوا و کاهش غلظت اکسیژن می‌شوند، عبارت‌اند از: CO₂، N₂ و H₂O که ظرفیت حرارتی بالای آن‌ها سبب افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط، جذب حرارت ناشی از احتراق و در نتیجه، کاهش دمای شعله و NO_x تولیدی می‌شود. رقیق‌کننده‌های دیگر مورد استفاده شامل H₂، CO، Ar، He و حتی NO هستند که هر یک به نحوی منجر به کاهش انتشار آلاینده NO_x می‌شوند [۳، ۱۷ و ۱۸].

به لحاظ اهمیت موضوع کنترل انتشار آلاینده‌ها، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. از این‌رو، رقیق‌سازی نیز به عنوان یک راه‌کار حین احتراقی که سبب کاهش چشمگیر آلاینده NO_x می‌شود، در بسیاری از پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. دیوید لیتل جان و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۲، به رقیق‌سازی شعله‌های پخشی در بویلرهای صنعتی و تأثیر آن بر انتشار آلاینده‌های NO_x و CO در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن اندکی رقیق‌کننده، پایداری شعله را بهبود می‌بخشد و میزان انتشار آلاینده‌ها را نیز کاهش می‌دهد.

دالی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۴، تحقیقاتی بر روی رقیق‌سازی احتراق با CO₂ و N₂ انجام دادند. نتایج این تحقیقات نشان داد که رقیق‌سازی با N₂ و CO₂، انتشار NO_x را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که شعله در داخل کوره، نامرئی به نظر آید. افزون بر این، رقیق‌سازی با گازهای بی‌اثر از طریق جریان سوخت باعث انتقال کسر مخلوط استوکیومتریکی به سمت ناحیه پرسوخت می‌شود؛ این امر کاهش انتشار NO_x را در پی دارد.

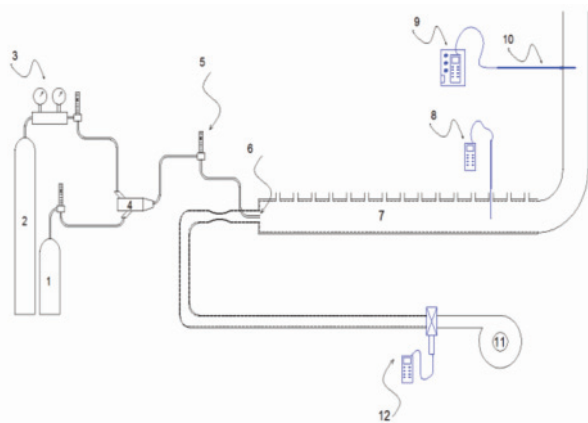
در همین سال، سالوادر و همکاران [۲۰]، بر روی رقیق‌سازی گاز طبیعی با N₂ تحقیقاتی را انجام دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن N₂، باعث پایین آمدن دمای آدیاباتیک شعله می‌شود و حدود ۶۰٪ میزان انتشار NO_x را در پی دارد.

در سال ۲۰۰۵، چو و چانگ [۲۱]، بر روی رقیق‌سازی با CO₂ و N₂ تحقیقاتی را انجام دادند. نتایج نشان داد که هر دو در کاهش NO_x

سوخت ورودی از روتامتر SWPF-06 A که قابلیت اندازه‌گیری دبی حجمی سوخت در محدوده ۰-۴۰ lit/min را دارد، استفاده شده است. دقت در محدوده سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه فلومتر $0.1 \sim 0.05$ m/s و میزان دقت تعریف شده در دامنه دبی‌های اندازه‌گیری شده توسط روتامتر $0.02 \pm$ lit/min است. برای اندازه‌گیری دما از حس گر نوع K که قابلیت اندازه‌گیری دما تا ۱۳۰۰ کلوین را دارد، استفاده شده است. برای جلوگیری از بروز خطای احتمالی، تمام تجهیزات پیش از انجام آزمایش‌ها کالیبره می‌شود.

شمای کلی کوره طراحی شده و تجهیزات جانبی آن در شکل (۲)

مشاهده می‌شود:



شکل (۲): کوره آزمایش: ۱. مخزن سوخت ۲. مخزن رقیق‌کننده ۳. فشارسنج ۴. کلکتور ۵. روتامتر ۶. ورودی سوخت و رقیق‌کننده ۷. محفظه احتراق ۸. حس گر دما ۹. آنالیزور گاز ۱۰. حس گر نمونه‌گیری ۱۱. فن هوا ۱۲. فلومتر

۵. نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف $\phi = (0.7-1.3)$

و دامنه نسبت‌های رقیق‌سازی $\beta = (0.1-1.0)$ برای رقیق‌کننده CO_2 صورت گرفته است. برای محاسبه نسبت رقیق‌سازی از رابطه (۸) استفاده شده است:

$$\beta = \frac{n_{Diluent}}{n_{Fuel}} \quad (8)$$

$n_{Diluent}$: تعداد مول‌های رقیق‌کننده و n_{Fuel} : تعداد مول‌های سوخت (پروپان) است.

برای بررسی تأثیر رقیق‌سازی بر دما، حس گر مربوط را (از طریق روزنه‌های تعبیه شده بر روی کوره) در داخل محفظه احتراق قرار داده و پس از رسیدن به حالت پایدار (ثابت) مقادیر به دست آمده ثبت شده است. دماها در فاصله ۶۰۰ میلی‌متری از ابتدای محفظه احتراق

تحمل دماهای بالا ساخته شده است. هوای مورد نیاز برای احتراق در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی توسط فن هوا (دریچه‌ای که برای تغییر در میزان دبی هوای ورودی بر روی آن تعبیه شده) تأمین می‌شود. سوخت و رقیق‌کننده پس از اختلاط در کلکتور، از طریق لوله‌ای به قطر ۴ میلی‌متر و هوای ورودی نیز از طریق لوله‌ای به قطر ۳۱ میلی‌متر وارد محفظه احتراق می‌شود و سپس با ایجاد جرقه، احتراق صورت می‌گیرد. محفظه احتراق از عایق پنبه‌بندی ۱۲۶۰ و پارچه نسوز به ضخامت ۱۵ میلی‌متر پوشیده شده است. ۱۵ روزنه به قطر ۲۰ میلی‌متر و به فاصله ۷۰ میلی‌متر از هم در بالای بدنه محفظه احتراق برای اندازه‌گیری دما و مشاهده شعله تعبیه شده است. برای اختلاط بهتر سوخت و رقیق‌کننده نیز، از یک کلکتور استفاده شده است. دبی سوخت و رقیق‌کننده قبل از ورود به کلکتور اندازه‌گیری، و سپس وارد کلکتور می‌شوند. همچنین برای کم کردن تلفات، کلکتور بهینه طراحی شده که طول شلنگ‌های رابط در آن کوتاه است و ورودی‌های سوخت و رقیق‌کننده، با زاویه ۴۵ درجه وارد کلکتور می‌شوند. ورودی‌های سوخت و رقیق‌کننده به کلکتور به گونه‌ای تعبیه شده‌اند که روبه‌روی هم نباشند، زیرا ممکن است موجب پس‌زنی جریان‌ها به داخل یکدیگر شوند. در کلکتورهای اولیه به دلیل زیاد بودن حجم کلکتور و قائم بودن زاویه ورودی سوخت و رقیق‌کننده به کلکتور و همچنین بلند بودن طول شلنگ‌های اتصال، تلفات زیاد، و سیستم اختلاط با مشکل مواجه می‌شود. از طرفی ممکن است به دلیل بیشتر بودن فشار کپسول رقیق‌کننده (CO_2)، نسبت به کپسول سوخت (پروپان)، گاز رقیق‌کننده به داخل کپسول سوخت پس زده و سیستم سوخت‌رسانی دچار مشکل شود.

به منظور کاهش فشار کپسول CO_2 (۷۰ بار)، از رگلاتور مخصوص گاز CO_2 استفاده شده که فشار آن را تا ۲/۵ بار که فشار مطلوب است، کاهش می‌دهد تا با فشار سوخت اصلی هنگام ورود به کلکتور هم‌فشار شود. این کاهش فشار باعث یخ‌زدگی بدنه کپسول CO_2 ، رگلاتور و روتامتر اندازه‌گیری دبی CO_2 و بروز مشکل در سیستم تغذیه می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، از گرمکن مخصوص کپسول گاز CO_2 استفاده شده است. مقدار گونه‌های شیمیایی موجود در گازهای خروجی که آلاینده NO_x (NO و NO_2) نیز جزئی از آنهاست، توسط دستگاه آنالیز گاز مدل Testo 350 XL (که محدوده اندازه‌گیری آن برای NO_x ، ۰-۳۰۰۰ ppm می‌باشد) با قرار دادن حس گر مربوط در لوله دودکش اندازه‌گیری می‌شود. دقت اندازه‌گیری‌های صورت گرفته $5 \pm$ ppm برای غلظت‌های کمتر از ۱۰۰ ppm است. برای اندازه‌گیری دبی هوا از دستگاه فلومتر Lutron YK-2005 AM و برای اندازه‌گیری دبی

اندازه‌گیری شده است.

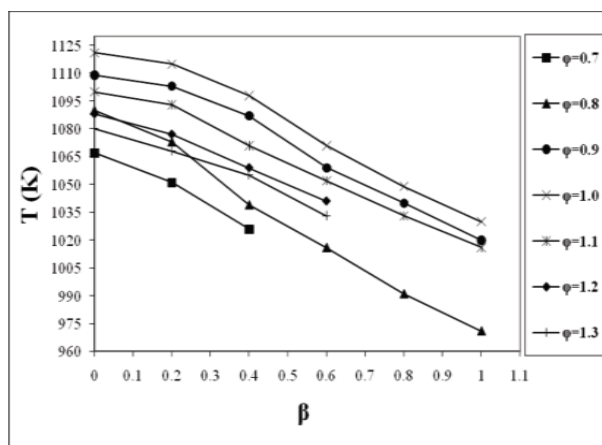
شکل (۳) نحوه اندازه‌گیری دما در داخل کوره را نشان می‌دهد.



شکل (۳): اندازه‌گیری دمای کوره در فاصله ۶۰۰ میلی‌متری از ابتدای آن

اندازه‌گیری دما توسط دو حس‌گر مجزا که پیش از انجام آزمایش‌ها کالیبره شده‌اند، صورت گرفته است تا در صورت بروز اختلاف میان اعداد مشاهده شده توسط دو حس‌گر، کالیبراسیون مجدد صورت گیرد. با افزودن CO₂ به محفظه احتراق در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی، به مقایسه نتایج با حالت بدون رقیق‌سازی پرداخته شده است.

شکل (۴)، تأثیر CO₂ بر دمای محفظه احتراق در فاصله ۶۰۰ میلی‌متری از ابتدای محفظه احتراق را در محدوده‌ای از نسبت‌های هم‌ارزی نشان می‌دهد.

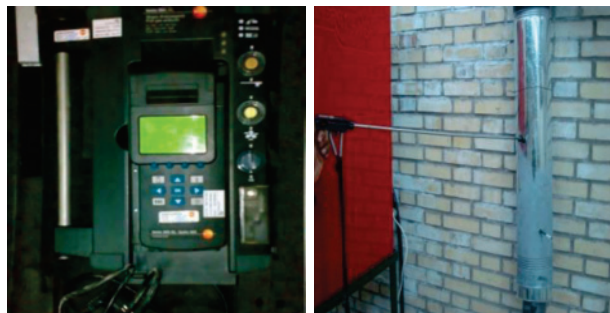


شکل (۴): تأثیر رقیق‌کننده CO₂ بر دمای محفظه احتراق در فاصله ۶۰۰ میلی‌متری از ابتدای کوره

همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، با افزودن رقیق‌کننده CO₂ به محفظه احتراق، دمای آن کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که دمای محفظه احتراق در نسبت هم‌ارزی ۱/۰ (حالت استوکیومتری)، به دلیل احتراق در حالت استوکیومتری و حضور اکسیژن لازم برای اکسیداسیون کامل سوخت، نسبت به سایر نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر است. به علت حضور گاز CO₂ موجود در مخلوط ورودی، ظرفیت حرارتی مخلوط افزایش می‌یابد و موجب جذب حرارت ناشی از

احتراق و در نتیجه، کاهش دمای محفظه احتراق می‌شود.

شکل (۵) نحوه نمونه‌گیری از گازهای خروجی (NO_x) داخل دودکش به همراه دستگاه آنالیز گاز را نشان می‌دهد.



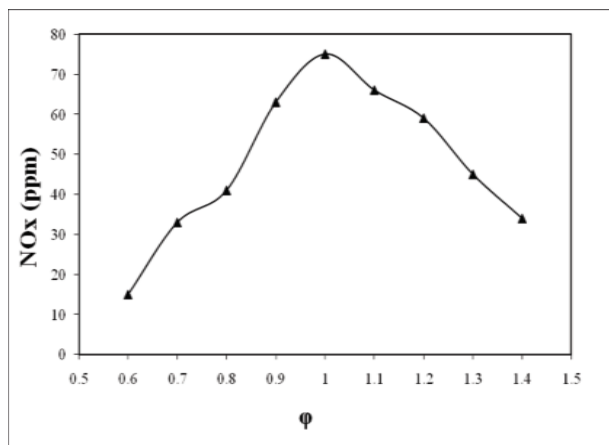
شکل (۵): نمونه‌گیری از گازهای خروجی دودکش و دستگاه آنالیز گاز

با قرار دادن حس‌گر مربوط در داخل دودکش و گذشت زمان و رسیدن به حالت پایدار، دستگاه شروع به ثبت داده‌های آزمایشگاهی می‌کند.

برای نمونه‌گیری، از دو حس‌گر که پیش از انجام آزمایش‌ها کالیبره شده‌اند، استفاده می‌شود. در صورت مشاهده اختلاف فاحش بین داده‌های ثبت شده، مجدداً با حس‌گر دیگر نمونه‌گیری می‌گردد تا از بروز خطا جلوگیری شود.

اندازه‌گیری NO_x در ۳ نقطه (نقطه انتهایی محفظه احتراق یا ابتدای خروجی دودکش و در ۲ نقطه مختلف از دودکش) صورت گرفته و مقادیر ثبت شده با هم برابر است؛ البته اندکی اختلاف در میزان NO و NO₂ دیده می‌شود که به دلیل تبدیل NO به NO₂ به محض تماس با اکسیژن است.

شکل (۶) نیز نتایج آزمایشگاهی تأثیر نسبت هم‌ارزی بر میزان انتشار آلاینده NO_x در شعله غیرپیش‌پروپان - هوا را بدون اعمال فرآیند رقیق‌سازی نشان می‌دهد.



شکل (۶): تأثیر نسبت هم‌ارزی بر انتشار آلاینده NO_x در شعله غیرپیش‌آمیخته پروپان - هوا بدون اعمال فرآیند رقیق‌سازی

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۶ تا نزدیک به حالت استوکیومتری (۱/۰ = ϕ)، میزان انتشار NO_x به تدریج افزایش می‌یابد و بعد از این مقدار بیشینه، با ورود به ناحیهٔ پرسوخت با افزایش نسبت هم‌ارزی میزان انتشار NO_x کاهش پیدا می‌کند. علت این تغییر در میزان انتشار NO_x ، دمای محفظهٔ احتراق و غلظت اکسیژن در هوای ورودی و همچنین کاهش زمان اقامت به دلیل افزایش سرعت ورودی است. در ناحیهٔ کم‌سوخت ($0/6 < \phi < 1/0$)، هرچند کسر مولی اکسیژن کم می‌شود، به دلیل افزایش دما، NO_x نیز افزایش می‌یابد. دما مهم‌ترین عامل در انتشار NO_x است، زیرا در معادلهٔ تشکیل NO حرارتی، به صورت تابع نمایی ظاهر می‌شود [۱۱]. در ناحیهٔ کم‌سوخت با افزایش نسبت هم‌ارزی، غلظت اکسیژن و نیتروژن در ورودی کاهش می‌یابد، اما احتراق به سمت احتراق استوکیومتری که عاملی مؤثر در افزایش حداکثر دمای شعله است، هدایت می‌شود. همچنین در این ناحیه، به دلیل پایین بودن دمای شعله، اکسیداسیون نیتروژن موجود به کندی صورت می‌پذیرد، در نتیجه افزایش دما سبب افزایش میزان انتشار NO_x می‌شود. در محدودهٔ نسبت هم‌ارزی ۱/۰، میزان انتشار NO_x به دلیل احتراق در حالت استوکیومتری و حضور اکسیژن لازم برای اکسیداسیون کامل سوخت، به بیشترین مقدار خود می‌رسد، اما با حرکت از حالت استوکیومتری به سمت ناحیهٔ پرسوخت، انتشار NO_x به سبب کاهش میزان غلظت اکسیژن و نیتروژن موجود در ورودی و همچنین کاهش دمای محفظهٔ احتراق، کاهش می‌یابد.

شکل (۷) نیز تأثیر رقیق‌سازی با CO_2 بر شعلهٔ غیرپیش‌آمیختهٔ پروپان - هوا را نشان می‌دهد.

در جدول (۱) حدود خاموشی شعله در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف نشان داده شده است.

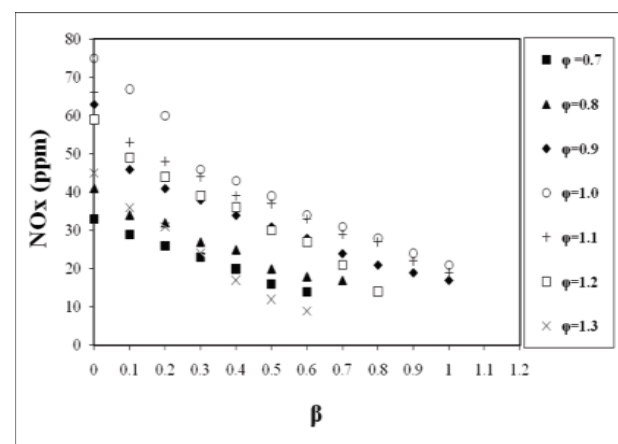
جدول (۱): حدود خاموشی در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی

نسبت هم‌ارزی	حدود خاموشی برای رقیق‌کننده CO_2 ($0/1 < \beta < 1/0$)
۰/۷	۰/۶۵
۰/۸	۰/۷۵
۰/۹	-
۱/۰	-
۱/۱	-
۱/۲	۰/۹
۱/۳	۰/۷

با توجه به جدول (۱) در حالت کم‌سوخت، به دلیل کم بودن کسر مولی سوخت در مخلوط، با افزودن رقیق‌کنندهٔ CO_2 کسر مولی سوخت در مخلوط کمتر از مقدار سوخت مورد نیاز برای شکل‌گیری احتراق است و شعله خاموش می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در مخلوط پرسوخت، به دلیل وجود نداشتن هوای کافی برای احتراق، شعله خاموش می‌شود.

در جدول (۲) نیز مقادیر حداکثر کاهش آلایندهٔ NO_x پس از اعمال رقیق‌سازی در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف دیده می‌شود؛ البته در برخی نسبت‌های هم‌ارزی همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، شعله خاموش می‌شود،

همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، با افزایش میزان گاز CO_2 ، انتشار NO_x کاهش می‌یابد. حضور رقیق‌کننده سبب افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط (به این دلیل که ظرفیت حرارتی CO_2 برابر با



شکل (۷): تأثیر رقیق‌کنندهٔ CO_2 بر انتشار آلایندهٔ NO_x در شعلهٔ غیرپیش‌آمیخته در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی

همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، با افزایش میزان گاز CO_2 ، انتشار NO_x کاهش می‌یابد. حضور رقیق‌کننده سبب افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط (به این دلیل که ظرفیت حرارتی CO_2 برابر با

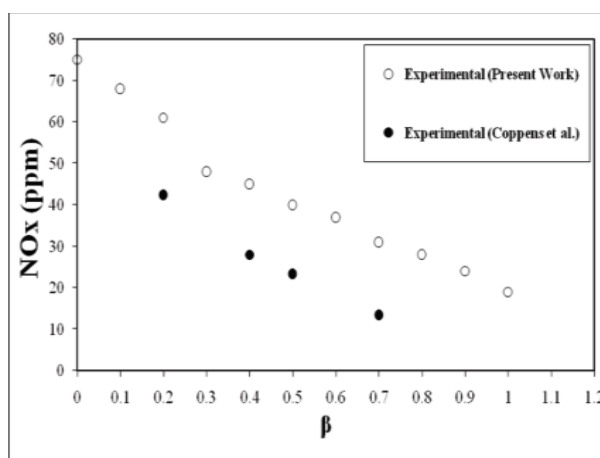
لذا مقادیر مذکور تا رسیدن به مرز خاموشی است.

جدول (۲): درصد کاهش NO_x در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی

نسبت هم‌ارزی	بیشینه کاهش آلاینده NO_x (%)
۰/۷	*۵۷
۰/۸	*۵۸
۰/۹	۷۳
۱/۰	۷۲
۱/۱	۷۱
۱/۲	*۷۶
۱/۳	*۸۰

* خاموشی شعله

در شکل (۸) نتایج آزمایشگاهی حاضر با نتایج آزمایشگاهی کوپنز و همکاران [۲۵] مقایسه شده است.



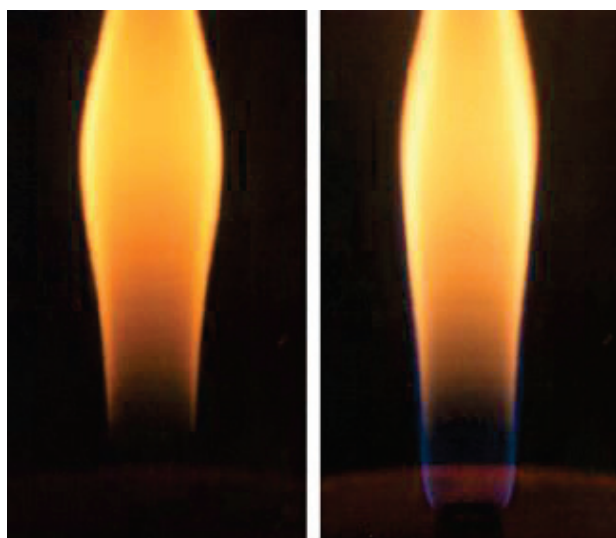
شکل (۸): مقایسه تأثیر رقیق‌کننده CO_2 بر NO_x انتشار یافته در محدوده‌ای از نسبت‌های رقیق‌سازی و نسبت هم‌ارزی ۱/۰ با نتایج آزمایشگاهی کوپنز و همکاران

همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود، نتایج حاصل، روند قابل قبولی را نشان می‌دهد. اختلاف مشاهده شده ممکن است به دلیل تغییر شرایط آزمایش، متفاوت بودن سوخت به کار رفته، استفاده از تجهیزات و وسایل اندازه‌گیری مختلف و خطای وسایل ثبت داده‌های آزمایشگاهی و خطای اپراتور باشد؛ البته لازم به ذکر است سوخت متان و پروپان تفاوت اندکی در میزان تشکیل آلاینده NO_x دارند [۲۶].

همچنین نتایج و مشاهدات عینی صورت گرفته نشان می‌دهد که رقیق‌سازی با CO_2 باعث افزایش شار مومتم، و منجر به گردابه‌ای بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه، اختلاط داخلی را زیاد، و سطح شعله را گسترده می‌کند. این امر باعث افزایش واکنش بین شعله و گردابه‌های

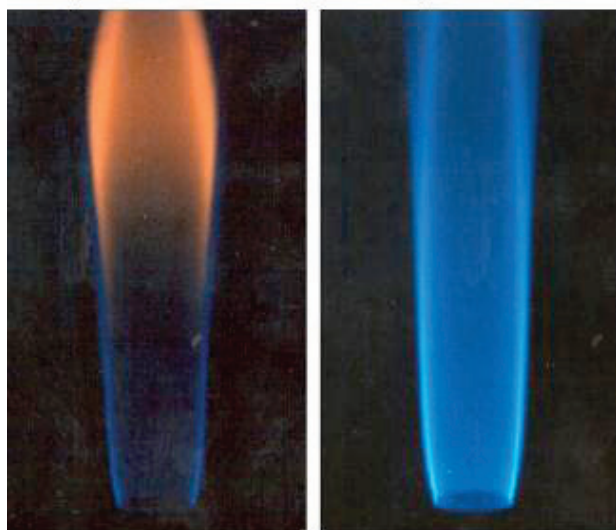
ایجاد شده، و در نهایت تغییر رنگ شعله و کاهش دمای آن می‌شود.

در شکل (۹)، عکس‌های گرفته شده از شعله در چندین نسبت رقیق‌سازی و در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ آورده شده است.



$\beta = 0.0$

$\beta = 0.3$



$\beta = 0.5$

$\beta = 0.9$

شکل (۹): تأثیر رقیق‌کننده CO_2 بر ساختار و رنگ شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ و نسبت‌های مختلف رقیق‌سازی

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت رقیق‌سازی CO_2 در مخلوط، طول شعله زیاد می‌شود و رنگ آن به سمت آبی میل می‌کند. علت این امر آن است که رقیق‌سازی با CO_2 منجر به تغییر چگالی مخلوط و افزایش قابل توجه در شار مومتم می‌شود. تأثیرات هیدرودینامیکی رقیق‌سازی با CO_2 علت دیگری است که باعث تغییر ساختار و رنگ شعله می‌شود. همچنین، رقیق‌سازی باعث افزایش سرعت مخلوط ورودی و زیاد شدن طول شعله می‌شود. پس از افزایش طول شعله، سوخت و اکسید کننده فرصت بیشتری برای ترکیب شدن

معمولا خطاهای ثابت با کالیبره شدن وسایل اندازه‌گیری از بین می‌روند، اما خطاهای تصادفی از طریق تحلیل آماری شناسایی می‌شوند. در این پژوهش، ابتدا برای هر نقطه چهار داده آزمایشگاهی جمع‌آوری و سپس میانگین حسابی داده‌ها محاسبه شده و به عنوان داده نهایی آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. در یک مرحله آزمایش، یعنی در یک نسبت هم‌ارزی و رقیق‌سازی در حالت پایدار، دما و NO_x در نقاط مشخصی پس از آب‌بندی، اندازه‌گیری شده‌اند.

مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده‌ها از فرمول زیر محاسبه

می‌شود:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{n^{0.5}} \quad (9)$$

در این فرمول، σ_m انحراف معیار مقدار میانگین و σ انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها و n تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه است. برای تمام نتایج تجربی، $n = 4$ است.

درصد عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی (X)، نیز از رابطه زیر

محاسبه می‌شود:

$$X \% = \frac{\sigma_m}{\bar{x}} \times 100 \quad (10)$$

X در این رابطه، مقدار میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی است.

در جدول (۴)، مقدار میانگین عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی

در خروجی کوره به تفکیک نشان داده شده است.

جدول (۴): مقادیر میانگین عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی

مقادیر میانگین عدم قطعیت مربوط به شعله پروپان- هوای رقیق شده با CO_2 در محدوده نسبت‌های هم‌ارزی و رقیق‌سازی مورد آزمایش	
NO_x	دما (در فاصله ۶۰۰ میلی‌متری از ابتدای کوره)
٪۳	٪۶

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، داده‌های ثبت شده برای NO_x با

$\pm 3\%$ قابل پذیرش و برای دما با $\pm 6\%$ قابل قبول است.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر رقیق‌سازی سوخت بر تشکیل آلاینده NO_x به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که:

- با رقیق‌سازی سوخت، دمای محفظه احتراق به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط و کاهش غلظت اکسیژن کاهش می‌یابد.

دارند و احتراق بهتر صورت می‌گیرد و در نتیجه رنگ شعله آبی می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، از میان اکسیدهای نیتروژن، NO_2 و N_2O آثار زیان‌بارتری بر اتمسفر دارند. NO تولید شده در کوره‌ها عموماً پس از قرار گرفتن در معرض هوا، واکنش می‌دهد و به تدریج به NO_2 تبدیل می‌شود؛ البته NO_2 کسر ناچیزی از NO_x را شامل می‌شود [۲۷]. دستگاه آنالیز گاز قابلیت نمایش NO و NO_2 به تفکیک را دارد که میزان انتشار NO_2 در مقایسه با NO بسیار کم است. میزان تشکیل این آلاینده‌ها در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی به تفکیک در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): تفکیک میزان NO_x اندازه‌گیری شده بر حسب NO و NO_2

نسبت هم‌ارزی	NO (ppm)	NO_2 (ppm)	NO_x (ppm)
۰/۷	۳۰	۳/۳	۳۳
۰/۸	۳۸	۲/۷	۴۱
۰/۹	۶۱	۲/۳	۶۳
۱/۰	۷۵	۰/۴	۷۵
۱/۱	۶۶	۰/۱	۶۶
۱/۲	۵۹	۰/۰	۵۹
۱/۳	۴۵	۰/۰	۴۵

همان‌گونه که از اعداد موجود در جدول (۳) مشاهده می‌شود، در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از ۱/۰ (کم‌سوخت)، میزان NO_2 تشکیل شده به دلیل وجود اکسیژن اضافی برای شکل‌گیری آن بیشتر است. به تدریج با پرسوخت شدن مخلوط، میزان تشکیل NO_2 به علت عدم حضور اکسیژن اضافی برای شکل‌گیری آن کاهش می‌یابد. مقادیر NO_x که توسط دستگاه آنالیز گاز نشان داده می‌شوند، برابر مجموع NO و NO_2 است که توسط دستگاه گرد شده‌اند.

۶. میزان خطا در داده‌های آزمایشگاهی

صرف نظر از دقت آزمایش، به دلایل مختلف ممکن است در جمع‌آوری داده‌های تجربی خطا وجود داشته باشد. بعضی از این خطاهای تصادفی، و برخی به علت بروز اشتباه حین انجام آزمایش است. داده‌های غلط حاصل از اشتباه‌های واضح، بلافاصله شناسایی و کنار گذاشته شده‌اند، اما در مورد داده‌هایی که مشکوک‌اند، به سادگی نمی‌توان تشخیص داد، بنابراین برای تشخیص این خطاهای تصادفی از تحلیل عدم قطعیت داده‌های تجربی که به روش آماری صورت می‌گیرد، استفاده می‌شود. عدم قطعیت یا مقدار احتمالی خطا بسته به شرایط آزمایش، ممکن است تغییر کند. خطاهای ثابت و تصادفی خطاهایی هستند که ممکن است در یک اندازه‌گیری تجربی، سبب عدم قطعیت گردند.

- نتایج آزمایشگاهی رقیق‌سازی با CO₂ در محدوده نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۷ تا ۱/۳، به طور متوسط تقریباً ۷۰٪ کاهش، تشکیل NO_x را نسبت به حالت $\beta = ۰/۰$ نشان می‌دهد.
- نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی کوپنز و همکاران مقایسه شده و روند قابل قبولی را نشان داده است.

- با افزایش نسبت رقیق‌سازی، دمای محفظه احتراق کاهش و در نتیجه، تشکیل آلاینده NO_x کاهش می‌یابد.
- نتایج آزمایشگاهی رقیق‌سازی با CO₂ در حالت استوکیومتری، ($\varphi = ۱/۰$)، نشان می‌دهد که به ازای $\beta = ۱/۰$ ، میزان تشکیل آلاینده NO_x نسبت به حالت $\beta = ۰/۰$ ، ۷۲٪ کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Hemmiki, K., "Cancer Risk of Air Pollution, Epidemiological Evidence", Environmental Health Perspectives, Vol. 102, October 4, 1994.
- [2] Zink, J., "Ultra Low NO_x Burners for Industrial Process Heater", 2nd International Conference on Combustion Technology for a Clean Environment, Lisbon, 1993.
- [3] Bell, S. R., Gupta, M., "Extinction of the Lean Operating Limit for Natural Gas Fueling of a Spark Ignited Engine Using Hydrogen Blending", Combustion Science and Technology, 123, pp. 23-48, 1997.
- [4] Schefer, R. W., Wicksall, D. M., Aggarwal, S. K., "Combustion of Hydrogen-Enriched Methane in a Lean Premixed Swirl Stabilized Burner", Proceedings of the 29th Symposium (International) on Combustion, pp. 843-851, 2002.
- [5] Hill, S. C., Smoot, L. D., "Modeling of Nitrogen Oxides Formation and Destruction in Combustion System", Progress in Energy Combustion Science, Vol. 26, pp. 417-458, 2000.
- [6] Liuzzo, G., Verdone, N., Bravi, M., "The Benefits of Flue Gas Recirculation in Waste Incineration", Waste Management 27, pp. 106-116, 2007.
- [7] Bowman, C., Miller, J. A., "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion", Progress in Energy and Combustion Science, 15, pp. 287-388, 1989.
- [8] Meunier, M., Karvalho, M. G., "The Formation and Destruction of NO in Turbulent Propane Diffusion Flames", Fuel, 77, pp. 1705-1714, 1998.
- [9] Zeldovich, Y. B., Sadovnikov, P. Y., "Oxidation of Nitrogen in Combustion", Science Academy of USSR, 1947.
- [10] Warnats, J., Mass, U., Dibble, R. W., COMBUSTION, Springer, 2000.
- [11] Lazić, L., Varga, M. A., Kizek, J., "An Experimental Study of the Influence of FGR on NO_x Formation", ISSN 1580-2949, Material in Technology, 38, 2004.
- [12] Littlejohn, D., Majeski, A. J., Shaheen, T., Castaldini, C., "Laboratory Investigation of an Ultralow NO_x Premixed Combustion Concept for Industrial Boilers", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 1115-1121, 2002.
- [13] Heinsohn, R. J. Kabel, R. L., Sources and Control of Air Pollution, Prentice Hall, New Jersey, pp. 652-666, 1991.
- [14] Fenimore, C. P., "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames", International Symposium on Combustion, 1971.
- [15] Turns, S. R., in Introduction to Combustion: Concepts and Applications, Mc. GrawHill Book Co., 2000.
- [16] Kim, H. K., Kim Y., "NO Reduction in 0.03-0.2 MW Oxy-Fuel Combustor Using Flue Gas Recirculation Technology", Proceedings of the Combustion Institute, 31, pp. 3377-3387, 2007.
- [17] Ren, J. Y., Qin, W., Egolfopoulos, F. N., Tsotsis, T. T., "Strain-Rate Effects on Hydrogen-Enhanced Lean Premixed Combustion", Combustion and Flame, 124, pp. 717-720, 2001.
- [18] Rortveit, G. J., Zepter, K., Skreiberg, O., Fossum, M., Hustad, J. E., "A Comparison of Low-NO_x Burners for Combustion of Methane and Hydrogen Mixtures", Proceedings of the Combustion Institute, 29, pp. 1123-1129, 2002.
- [19] Dally, B. B., Riesmeier, E., Peters, N., "Effect of Fuel Mixture on Moderate and Intense Low Oxygen Dilution Combustion", Combustion and Flame, 137, pp. 418-431, 2004.
- [20] Salvador, S., Kara, Y., Commandre, J. M., "Reduction of NO Emissions from a VOC Recuperative Incinerator by Dilution of the Fuel Supply", Applied Thermal Engineering, 24, pp. 245-254, 2004.
- [21] Cho, E. S., Chung, S. H., "Numerical Study on NO Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides", Journal of Mechanical Science and Technology (KSME International Journal), Vol. 19, No. 6, pp. 1358-1365, 2005.
- [22] Giles D. E., Sibendu, S., Aggarwal, S. K., "NO_x Emission Characteristics of Counter-Flow Syngas Diffusion Flames with Airstream Dilution", Fuel, 85, pp. 1729-1742, 2006.
- [23] Park, J., Bae, D. S., Cha, M. S., Yun, J. H., Keel, S. I., Cho, H. C., Kim, T. K., Ha, J. S. "Flame Characteristics in H₂/CO Synthetic Gas Diffusion Flames Diluted With CO₂: Effects of Radiative Heat Loss and Mixture Composition", International Journal of Hydrogen Energy, 33, pp. 7256-7264, 2008.
- [24] Kumar, P., Mishra, D. P., "Characterization of Bluff-Body Stabilized LPG Jet Diffusion Flame with N₂ Dilution", Energy Conversion and Management, 49, pp. 2698-2703, 2008.
- [25] Coppens, F.H.V., De Ruyck, J., Konnov, A.A., "The Effects of Composition on Burning Velocity and Nitric Oxide Formation in Laminar Premixed Flames of CH₄+ H₂+O₂+N₂", Combustion and Flame, 149, pp. 409-417, 2007.
- [26] Littlejohn, D., Cheng, R.K., "Fuel Effects on a Low Swirl Injection for Lean Premixed Gas Turbines", Proceedings on the Combustion Institute, 31, pp. 3155-3162, 2007.
- [27] Zhao, D., Yamashita, H., Kitawaga, K., Arai, N., Furuhashi, T., "Behavior and Effect on NO_x Formation of OH Radical in Methane-Air Diffusion Flame with Steam Addition", Combustion and Flame, 130, pp. 352-360, 2002.