



مطالعه عددی و آزمایشگاهی تاثیر رقیق‌ساز N_2 بر تشکیل آلاینده NO_x در شعله پیش‌آمیخته متان - هوا

محمد محمودی آریا* و حمید ممهدی هروی**

دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۹/۲/۵، پذیرش: ۱۳۸۹/۵/۲۱)

رقیق‌سازی به عنوان یکی از روش‌های کاهش دمای بیشینه محفظه احتراق محسوب می‌شود که سبب کاهش تشکیل NO گرمایی می‌شود. روش‌های کنترل تشکیل NO_x همگی بر اساس کنترل دما و یا محدود کردن غلظت اکسیژن استوار است. در تحقیق حاضر، هدف مطالعه عددی و آزمایشگاهی تاثیر رقیق‌ساز N_2 برروی تشکیل آلاینده NO_x در شعله پیش‌آمیخته متان - هوا در محفظه احتراق است. نتایج آزمایشگاهی با ساخت کوره‌ای با محفظه احتراق استوانه‌ای که دارای تقارن محوری است به دست آمده‌اند. آزمایش‌ها برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۷ تا ۱/۳ و نسبت‌های مختلف رقیق‌سازی انجام شده است. شبیه‌سازی احتراق به وسیله زیربرنامه PREMIX نرم‌افزار CHEMKIN II و با استفاده از نسبت‌های مختلف رقیق‌ساز N_2 و در محدوده‌ای از نسبت‌های هم‌ارزی بررسی شده است. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش نسبت رقیق‌سازی دمای بیشینه شعله و انتشار آلاینده NO_x از محفظه احتراق کاهش می‌یابند. همچنین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی حاضر توافق خوبی را نشان می‌دهند و روند نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی نیازکوف و همکاران مطابقت دارد.

واژگان کلیدی: NO_x ، رقیق‌سازی، شبیه‌سازی، آزمایشگاهی، پیش‌آمیخته

مقدمه

احتراق سوخت‌های فسیلی منجر به آلودگی قابل ملاحظه‌ای شده است و یکی از عوامل اصلی گرم شدن زمین محسوب می‌شود که دلیل این امر انتشار آلاینده‌هایی از قبیل NO_x ، SO_x ، CO و CO_2 است [۱]. هنگامی که سوخت‌های فسیلی از قبیل گاز طبیعی یا نفت و ترکیبات مشتق شده از آن‌ها در هوا می‌سوزند، محصولات اکسیداسیون شامل CO ، CO_2 و H_2O هستند، به علاوه مولکول نیتروژن موجود در هوا با برخی از مولکول‌های اکسیژن موجود در آن واکنش داده و اکسیدهای نیتروژن شکل می‌گیرند [۲]. اکسیدهای نیتروژن شامل اکسید نیتریک (NO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و اکسید نیتروس (N_2O) هستند که NO و NO_2 به عنوان NO_x شناخته می‌شوند [۳]. NO تولید شده از مولکول نیتروژن و اکسیژن موجود در هوا، NO گرمایی (زلدوویچ) و NO تولید شده از مولکول نیتروژن موجود در سوخت، NO سوخت نامیده می‌شود. غلظت NO در نزدیکی ناحیه شعله برای سوخت‌های هیدروکربنی وابستگی کمتری به دما دارد و رادیکال‌هایی مانند O و OH به تشکیل NO کمک می‌کنند. بنابراین، بخشی از NO علی‌رغم کنترل دمای شعله و غلظت اکسیژن شکل می‌گیرد که به آن NO فوری (Prompt) گفته می‌شود [۴ و ۵].

گاز طبیعی به عنوان سوختی که احتراق آن انتشار آلاینده کمتری را در پی دارد، از تمیزترین سوخت‌ها محسوب می‌شود (به دلیل کسر مولی پایین‌تر کربن نسبت به هیدروژن)، که دلیل این امر ساختار شیمیایی ساده و عدم مشکل تبخیر سوخت است.

* دانشجوی کارشناسی ارشد (ایمیل: Mohammad.Arya62@Gmail.com)

** استادیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: Heravihm@mshdiau.ac.ir)

اعمال رقیق‌سازی به عنوان یک خط‌مشی جهت دستیابی به انتشار NO_x کمتر در بسیاری از مقالات مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌است. این اصل بر گسترش حدود اشتعال‌پذیری به سمت شرایط رقیق‌سوز استوار است که کاهش قابل توجه اکسیدهای نیتروژن را به همراه دارد [۶-۸]. احتراق پیش‌آمیخته رقیق‌سوز بسیار مورد توجه قرار گرفته است، زیرا باعث پایین آمدن دمای شعله و در نتیجه انتشار NO_x کمتر می‌شود، هرچند در نزدیکی حدود اشتعال‌پذیری رقیق‌سوز، پایداری شعله کم‌شده و پدیده خاموشی ممکن است اتفاق بیفتد. به علاوه شعله‌های رقیق‌سوز ممکن است منجر به مشکلاتی از قبیل خاموشی، بازده احتراق پایین و غلظت‌های بالاتر مونوکسیدکربن (CO) شوند، که یک راه حل عملی برای غلبه بر این مشکلات، افزودن سوخت‌های واکنش‌پذیرتر مانند هیدروژن است [۹-۱۱].

از بین اکسیدهای مختلف نیتروژن، NO و NO_2 ، به لحاظ اثرات سوء بر سلامت انسان و N_2O به عنوان گاز گلخانه‌ای در گرمایش زمین اهمیت دارند. NO_x ابتدا به صورت NO در جریان احتراق از ترکیب نیتروژن و اکسیژن هوا در دمای بالا و به ویژه در موتورهای احتراق داخلی و کوره‌ها تشکیل می‌شود و پس از ورود به هوا به سرعت تبدیل به NO_2 می‌شود [۱۲]. چون کوره‌های صنعتی (از قبیل دیگ بخارهای نیروگاهی) اغلب تحت شرایط پراکسیژن کار می‌کنند (محدوده نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ تا ۰/۹)، شرایط برای تولید NO فوری فراهم نبوده و به این دلیل است که سوخت‌های گازی حاوی نیتروژن نیستند، NO سوخت نیز تشکیل نمی‌شود و در نتیجه NO گرمایی تولید می‌شود [۱۳]. در رابطه (۱)، واکنش‌های تشکیل NO زلدوویچ دیده می‌شود:



این واکنش‌ها به عنوان واکنش‌های تشکیل NO گرمایی نیز شناخته می‌شوند، زیرا واکنش اول به دلیل پیوند سه‌گانه قوی در مولکول N_2 دارای انرژی فعال‌سازی بسیار بالایی است، بنابراین فقط در دماهای بالا واکنش سریع انجام می‌گیرد، در غیر این‌صورت واکنش اول، محدود کننده تشکیل NO گرمایی است. برای محاسبه غلظت NO گرمایی از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۱۳]:

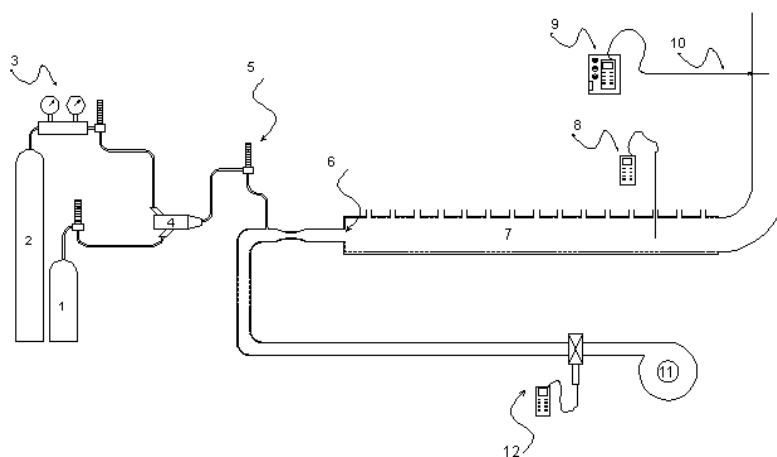
$$[NO] = K_1 \exp\left(\frac{-K_2}{T}\right) [N_2] [O_2]^{1/2} \quad (2)$$

در این رابطه، K_1 و K_2 ثابت‌های سینتیکی واکنش، t زمان و T دماست، همچنین کرشه 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 گرمایی به شدت به دما حساس است. در معادله تشکیل NO، دما به صورت تابعی نمایی نقش دارد و از آنجا که در دماهای بالاتر از 1700 K به ازای هر ۴۰ درجه افزایش دما، تولید NO دو برابر می‌شود و همچنین به دلیل انرژی فعال‌سازی بالای سازوکار تشکیل NO، اگر روشی موجب کاهش دمای شعله شود، عاملی موثر جهت کاهش تشکیل NO_x است [۱۴ و ۱۵].

رقیق‌سازی روشی است که با افزودن یک رقیق‌کننده که ظرفیت گرمایی بالایی دارد، ظرفیت گرمایی مخلوط را زیاد کرده و با افزایش توانایی جذب گرما از کوره دمای محفظه احتراق را کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش انتشار آلاینده NO_x می‌شود [۱۶]. از جمله رقیق‌کننده‌هایی که سبب رقیق‌سازی مخلوط سوخت و هوا و کاهش غلظت اکسیژن می‌شوند عبارت‌اند از CO_2 ، N_2 و H_2O که ظرفیت گرمایی بالای این گونه‌ها سبب افزایش ظرفیت گرمایی مخلوط، جذب گرمای ناشی از احتراق و در نتیجه کاهش دمای شعله و NO_x تولیدی می‌شود [۱۷]. رقیق‌کننده‌های دیگر مورد استفاده عبارت‌اند از H_2 ، CO، Ar، He و NO، که هریک به نحوی منجر به کاهش انتشار آلاینده NO_x می‌شوند [۶ و ۷].

دستگاه آزمایشگاهی

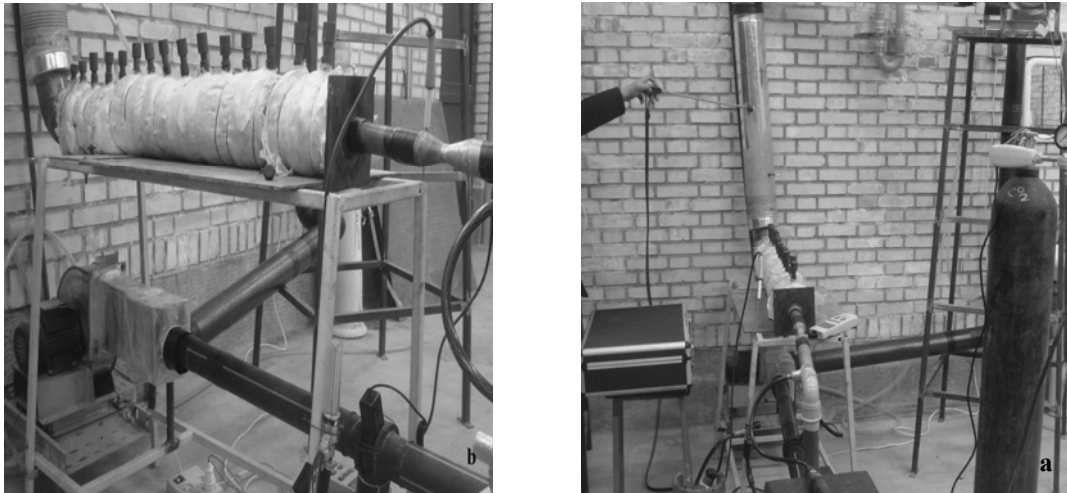
برای انجام آزمایش‌ها به منظور بررسی تاثیر رقیق‌سازی بر تشکیل آلاینده NO_x ، کوره‌ای بدین منظور طراحی و ساخته شد. بدنه اصلی محفظه احتراق را لوله فولادی AISI 316 توخالی به قطر ۱۰۵ میلی‌متر و طول ۱۰۰۰ میلی‌متر تشکیل می‌دهد که قابلیت تحمل دماهای بالا را دارد. هوای مورد نیاز برای احتراق در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی توسط فن هوا که در پیچه‌ای به منظور تغییر در میزان دبی هوای ورودی بر روی آن تعبیه شده است، تامین می‌شود. سوخت و رقیق‌کننده پس از اختلاط در کلکتور (Collector)، با هوای ورودی مخلوط شده و به منظور اختلاط بهتر وارد یک ونتوری می‌شود و سپس از طریق لوله‌ای به قطر ۳۵ میلی‌متر وارد محفظه احتراق شده و با ایجاد جرقه، احتراق صورت می‌گیرد. محفظه احتراق از عایق پنبه هندی 1260 و پارچه نسوز به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر پوشیده شده است. برای اندازه‌گیری دما در نقاط انتهایی کوره و همچنین مشاهده شعله، ۱۵ روزنه به قطر ۲ سانتی‌متر و به فاصله ۷ سانتی‌متر از هم در بالای بدنه محفظه احتراق تعبیه شده است. همچنین وجود ونتوری در مسیر ورودی مخلوط پیش‌آمیخته متان- هوا سبب جلوگیری از پس‌زنی احتمالی شعله خواهد شد. جهت اختلاط بهتر سوخت و رقیق‌کننده، از یک کلکتور استفاده شده است. دبی سوخت و رقیق‌کننده قبل از ورود به کلکتور اندازه‌گیری شده و سپس وارد آن می‌شوند. با طراحی کلکتورهای مختلف به منظور به حداقل رساندن اتلافات، کلکتور بهینه طراحی شد که در آن طول لوله‌های اتصال کوتاه در نظر گرفته شده و ورودی سوخت و رقیق‌کننده تحت زاویه ۴۵ درجه وارد کلکتور می‌شوند. طرحواره کوره طراحی شده و تجهیزات جانبی آن در شکل (۱) دیده می‌شود. شکل (۲)، نمای کلی از کوره و تجهیزات جانبی استفاده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- قسمت آزمایش: ۱- مخزن سوخت ۲- مخزن رقیق‌ساز ۳- فشارسنج ۴- کلکتور ۵- روتامتر ۶- ورودی سوخت و هوا ۷- محفظه احتراق ۸- ترموکوپل ۹- آنالیزور گاز ۱۰- میله اندازه‌گیری ۱۱- فن هوا ۱۲- دبی‌سنج

برای کاهش فشار داخل کپسول ازت و رساندن فشار آن از ۱۴۰ بار به فشار مطلوب، از فشارسنج MORRIS، که قابلیت تحمل ۲۰۰ بار فشار ورودی را داشته و توان کاهش فشار تا ۱ بار را دارد استفاده شده است تا با فشار سوخت اصلی هم‌فشار شود. مقدار گونه‌های شیمیایی موجود در گازهای خروجی که آلاینده NO_x (NO و NO_2) هم جزئی از آن است توسط دستگاه آنالیز گاز مدل Testo 350 XL (که محدوده اندازه‌گیری NO_x ، در آن صفر تا ۳۰۰۰ ppm است) با قرار دادن حسگر مربوط در لوله دودکش اندازه‌گیری می‌شود. همچنین دستگاه آنالیز گاز قابلیت محاسبه و نمایش بازده احتراق را نیز دارد. دقت اندازه‌گیری‌های انجام شده ± 5 ppm برای غلظت‌های کمتر از ۱۰۰ ppm است. برای اندازه‌گیری دبی هوا از دستگاه دبی‌سنج

Lutron YK-2005AM و برای اندازه‌گیری دبی سوخت ورودی از روماتر SWPF-06A که قابلیت اندازه‌گیری دبی حجمی سوخت صفر تا ۴۰ lit/min را دارد، استفاده شده است. دقت سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه دبی‌سنج ۰/۱ ~ ۰/۰۵ m/sec و دقت دبی‌های اندازه‌گیری شده توسط روماتر ۰/۰۲ lit/min ± است. همچنین دبی‌سنج قابلیت نشان دادن دما با اتصال به حسگر مربوطه را دارد. برای اندازه‌گیری دما از حسگر نوع K که قابلیت اندازه‌گیری دما تا ۱۳۰۰ درجه کلوین را دارد استفاده شده است. تمامی تجهیزات پیش از انجام آزمایش کالیبره شده تا از بروز خطای احتمالی در داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده تا حد امکان جلوگیری شود.



شکل ۲- نمای کلی قسمت آزمایش؛ (a) نمای کامل، (b) محفظه احتراق

میزان خطا در داده‌های آزمایشگاهی

صرف‌نظر از دقت آزمایش، به دلایل مختلف ممکن است در جمع‌آوری داده‌های تجربی خطا وجود داشته باشد. بعضی از این خطاها از نوع تصادفی هستند و بعضی به دلیل بروز اشتباه حین انجام آزمایش به وجود می‌آیند. داده‌های غلط حاصل از اشتباهات واضح بلافاصله قابل شناسایی بوده و کنار گذاشته شده‌اند. ولی در مورد داده‌هایی که مشکوک هستند به سادگی نمی‌توان تشخیص داد. بنابراین جهت تشخیص این خطاها، از تحلیل عدم قطعیت داده‌های تجربی که به روش آماری صورت گرفته، استفاده شده است. عدم قطعیت یا مقدار احتمالی خطا بسته به شرایط آزمایش ممکن است به مقدار زیادی تغییر کند. خطاهای ثابت و تصادفی خطاهایی هستند که ممکن است در یک اندازه‌گیری تجربی سبب عدم قطعیت شوند. معمولاً خطاهای ثابت با کالیبره کردن وسایل اندازه‌گیری از بین می‌روند ولی خطاهای تصادفی از طریق تحلیل آماری شناسایی می‌شوند. در این پژوهش، ابتدا برای هر نقطه، چهار داده آزمایشگاهی جمع‌آوری شده و سپس میانگین حسابی داده‌ها محاسبه و به عنوان داده نهایی آزمایشگاهی استفاده شده است. مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده‌ها از فرمول زیر محاسبه شده است:

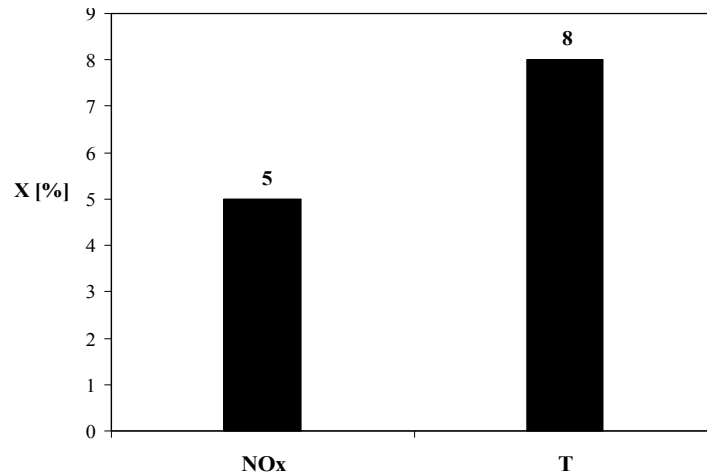
$$\sigma_m = \frac{\sigma}{n^{0.5}} \quad (3)$$

در این فرمول، σ_m انحراف معیار مقدار میانگین و σ انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها و n تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه است. برای کلیه نتایج تجربی که برای تاثیر رقیق‌کننده N_2 به محفظه احتراق انجام شده است، $n = 4$ است.

مقدار درصد عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی، (X) ، از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$X \% = \frac{\sigma_m}{\bar{x}} \times 100 \quad (4)$$

که در آن \bar{x} مقدار میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی است. در شکل (۳) مقدار میانگین عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی در خروجی کوره نشان داده شده است.



شکل ۳- مقادیر میانگین عدم قطعیت برای NO_x در خروجی و دما در فاصله ۶۰۰ میلی‌متر از ابتدای محفظه احتراق در شعله متان- هوای رقیق شده با N₂ در محدوده‌ای از نسبت‌های مختلف هم‌ارزی و رقیق‌سازی

شبیه‌سازی عددی

در مطالعه حاضر به منظور بررسی تاثیر رقیق‌سازی بر آلاینده NO_x تولیدی شعله پیش‌آمیخته متان- هوا از زیربرنامه PREMIX نرم‌افزار CHEMKIN II [۲۳] استفاده شده است. زیربرنامه PREMIX برنامه‌ای به زبان فرترن است که برای مدل‌سازی شعله آرام پیش‌آمیخته یک‌بعدی به کار می‌رود. این زیربرنامه از یک روش ترکیبی حالت پایدار و وابسته به زمان استفاده می‌کند [۲۴]. برای احتراق متان از سازوکار تفصیلی GRI-MECH 3.0 [۲۵] استفاده شده است که شامل ۵۳ گونه شیمیایی و ۳۲۵ واکنش است.

معادلات حاکم در حالت یک بعدی، توسط معادلات زیر بیان می‌شوند [۲۶-۲۸]:

معادله پیوستگی:

$$\dot{M} = \rho u A \quad (5)$$

معادله بقای انرژی:

$$\dot{M} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{C_p} \frac{d}{dx} (\lambda A \frac{dT}{dx}) + \frac{A}{C_p} \sum_{k=1}^k \rho Y_k V_k C_{pk} \frac{dT}{dx} + \frac{A}{C_p} \sum_{k=1}^k \dot{\omega}_k h_k W_k = 0 \quad (6)$$

بقای گونه:

$$\dot{M} \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho A Y_k V_k) - A \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (k=0,1,\dots,K) \quad (7)$$

معادله حالت:

$$\rho = \frac{P \bar{W}}{RT} \quad (8)$$

در این معادلات، x مختصه سیستم انتخابی، \dot{M} دبی جرمی، T دما، Y_k کسر جرمی گونه k ام، P فشار، u سرعت مخلوط سیال، ρ چگالی، W_k جرم مولکولی گونه k ام، \bar{W} جرم مولکولی متوسط مخلوط، R ثابت جهانی گازها، λ ضریب هدایت مخلوط، C_p ظرفیت گرمایی مخلوط در فشار ثابت، C_{pk} ظرفیت گرمایی در فشار ثابت برای گونه k ام، ω_k نرخ مولار تولیدی توسط گونه k ام در واکنش‌های شیمیایی بر واحد حجم، h_k انتالپی مخصوص گونه k ام، V_k سرعت پخش گونه k ام و A سطح مقطع ایجاد شده توسط شعله که در پیش‌فرض ثابت و برابر واحد در نظر گرفته شده است.

فرایند حل عددی با روش تخمین تفاضل محدود به منظور تولید مقادیر مرزی مسئله شروع می‌شود و به سیستم معادلات جبری تبدیل می‌شود. تخمین‌های اولیه معمولاً روی یک شبکه، با شبکه محاسباتی خیلی درشت صورت می‌گیرد که ممکن است فقط شامل ۵ یا ۶ نقطه باشد. بعد از به دست آوردن حل روی شبکه محاسباتی درشت، نقاط شبکه محاسباتی جدید در نواحی‌ای که حل یا گرادیان آن تغییرات ناگهانی داشتند، اضافه می‌شود [۲۳ و ۲۹]. حال با یک حدس جدید برای حل شبکه، شبکه محاسباتی ظریف‌تر که درون شبکه محاسباتی درشت جا داده شده است اعمال می‌شود. این فرایند تا زمانی که نقاط شبکه محاسباتی جدید برای حل مسئله مورد نیاز نباشد، تکرار می‌شود. به عبارتی دیگر خطای بین دو حل متوالی از مقدار تعیین شده کمتر باشد.

مشخصات شبکه محاسباتی در این شبیه‌سازی $GRAD = 0.1$ (GRAD متغیر توافقی که تعداد شبکه و نقاط درون نواحی با گرادیان بالا را کنترل می‌کند و مقادیر کمتر آن سبب می‌شود نقاط بیشتر شبکه مورد استفاده قرار گیرند) و $CURV = 0.1$ (متغیر توافقی شبکه که شبکه و نقاط درون نواحی با انحنای بالا را کنترل می‌کند و مقادیر کم آن سبب می‌شود نقاط بیشتر شبکه مورد استفاده قرار گیرند) است. معیارهای خطای نسبی و مطلق (برای تکرار نهایی حل نیوتن) به ترتیب $RTOL = 1E-4$ و $ATOL = 1E-9$ است. با توجه به نسبت‌های مختلف رقیق‌ساز N_2 که از صفر تا ۲/۰ متغیر است، کسرهای مولی در ورودی زیربرنامه PREMIX اعمال شده‌اند و تاثیر آن بر دمای بیشینه شعله و تشکیل آلاینده NO_x بررسی شده است. البته در خروجی نرم‌افزار، غلظت‌های NO و NO_2 به تفکیک مشخص‌اند اما به دلیل اینکه مقادیر غلظت NO_2 در مقایسه با NO بسیار ناچیز است از آن چشم‌پوشی شده است.

نتایج و بحث

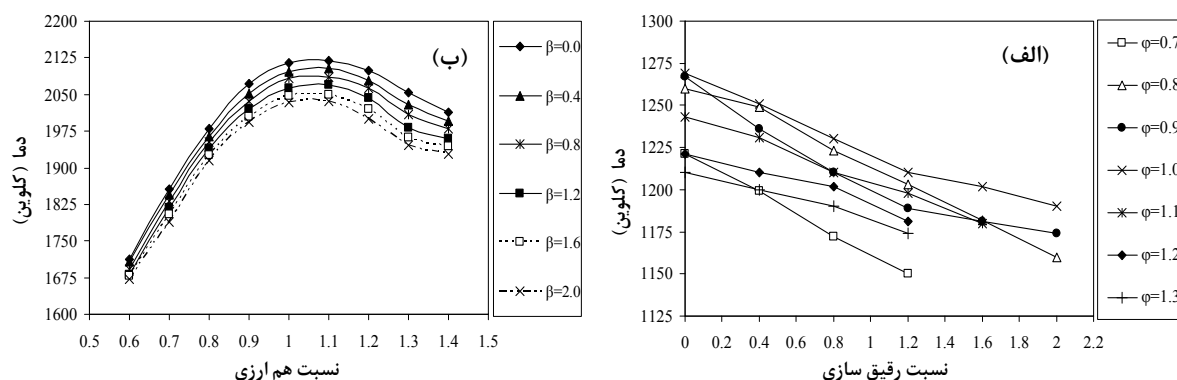
نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۷ تا ۱/۳ و نسبت‌های رقیق‌سازی (β) ، صفر تا ۲/۰ برای رقیق‌ساز N_2 به دست آمده است. برای محاسبه نسبت رقیق‌سازی (β) ، از رابطه (۹) استفاده شده است:

$$\beta = \frac{n_{Diluent}}{n_{Fuel}} \quad (9)$$

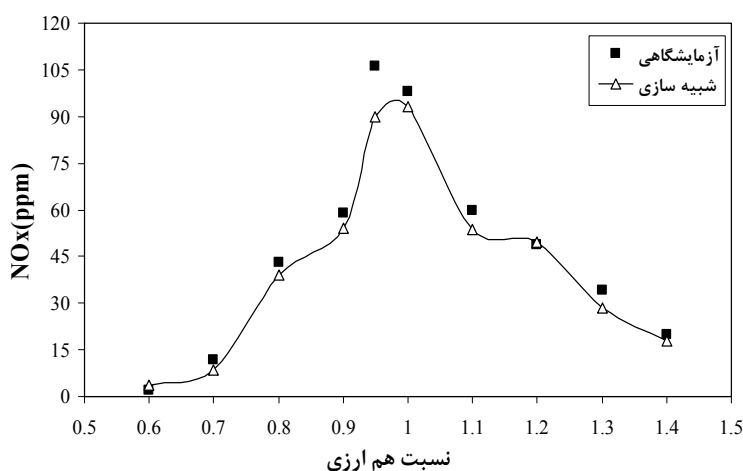
$n_{Diluent}$ ، تعداد مول‌های رقیق‌کننده و n_{Fuel} ، تعداد مول‌های سوخت (متان) هستند. البته در برخی مقالات، نسبت رقیق‌سازی به صورت تعداد مول‌های رقیق‌کننده به مجموع تعداد مول‌های رقیق‌کننده و سوخت و در برخی دیگر به صورت تعداد مول‌های رقیق‌کننده به مجموع تعداد مول‌های رقیق‌کننده و هوای ورودی است [۳۰].

با افزودن رقیق‌ساز N_2 به محفظه احتراق در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی، به مقایسه و بررسی آن‌ها با حالت‌های بدون رقیق‌سازی پرداخته شده است. شکل (۴)، تاثیر رقیق‌سازی با N_2 بر دمای بیشینه شعله و همچنین دمای محفظه احتراق که در فاصله ۶۰۰ میلی‌متر از ابتدای محفظه احتراق اندازه‌گیری شده است را در محدوده‌ای از نسبت‌های هم‌ارزی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه از ترموکوپل نوع K استفاده شده و این نوع ترموکوپل قابلیت اندازه‌گیری دما را تا ۱۳۰۰ درجه کلون دارد، دماها در فاصله ۶۰۰ میلی‌متر از ابتدای محفظه احتراق اندازه‌گیری شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۴-الف) دیده می‌شود با

افزودن رقیق‌ساز N_2 به محفظه احتراق، دمای محفظه احتراق کاهش می‌یابد. شکل (۴-ب) نیز نشان می‌دهد که با تزریق رقیق‌ساز N_2 به محفظه احتراق، دمای بیشینه شعله نیز کاهش یافته است. به علاوه دیده می‌شود که در نسبت هم‌ارزی ۱، (حالت استوکیومتری)، دمای محفظه احتراق در فاصله ۶۰۰ میلی‌متر از ابتدای محفظه احتراق و همچنین دمای بیشینه شعله نسبت به سایر نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر است که به دلیل احتراق در حالت استوکیومتری و حضور اکسیژن لازم جهت اکسیداسیون کامل سوخت است. به دلیل حضور گاز N_2 موجود در مخلوط ورودی به محفظه احتراق، ظرفیت گرمایی مخلوط افزایش می‌یابد که موجب جذب گرمای ناشی از احتراق و در نتیجه کاهش دمای شعله و محفظه احتراق خواهد شد. شکستن پیوند سه‌گانه مولکول نیتروژن واکنشی گرماگیر است که گرمای مورد نیاز جهت شکستن این پیوند سه‌گانه را از شعله دریافت کرده و سبب کاهش دمای شعله خواهد شد. هرچند غلظت نیتروژن افزایش می‌یابد اما چون دما کاهش یافته و طبق رابطه (۲) دما به صورت نمایی ظاهر شده است لذا کاهش انتشار آلاینده NO_x را در پی دارد. شکل (۵)، نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تاثیر نسبت هم‌ارزی بر میزان انتشار آلاینده NO_x در شعله پیش‌آمیخته متان- هوا بدون رقیق‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- تاثیر رقیق‌ساز N_2 بر دما، (الف) دمای محفظه احتراق در فاصله ۶۰۰ میلی‌متر از ابتدای محفظه احتراق (آزمایشگاهی)، (ب) دمای بیشینه شعله (شبیه‌سازی)

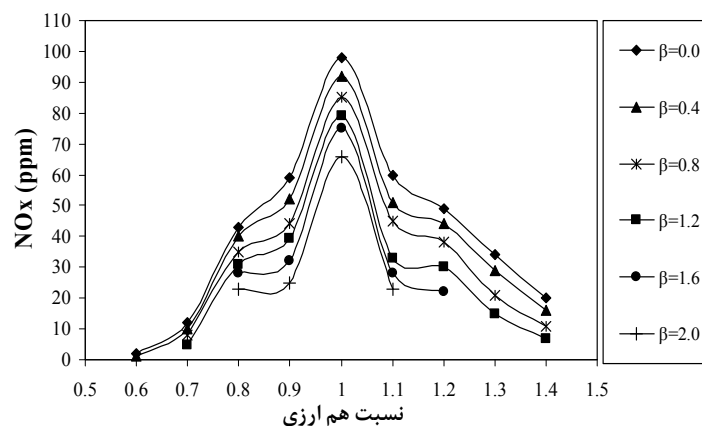


شکل ۵- تاثیر نسبت هم‌ارزی بر انتشار NO_x و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بدون رقیق‌سازی

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۶ تا نزدیک به حالت استوکیومتری، یعنی نسبت هم‌ارزی ۰/۹۵، میزان انتشار NO_x روندی صعودی را طی می‌کند و بعد از این مقدار بیشینه، با ورود به ناحیه پرسوخت با افزایش

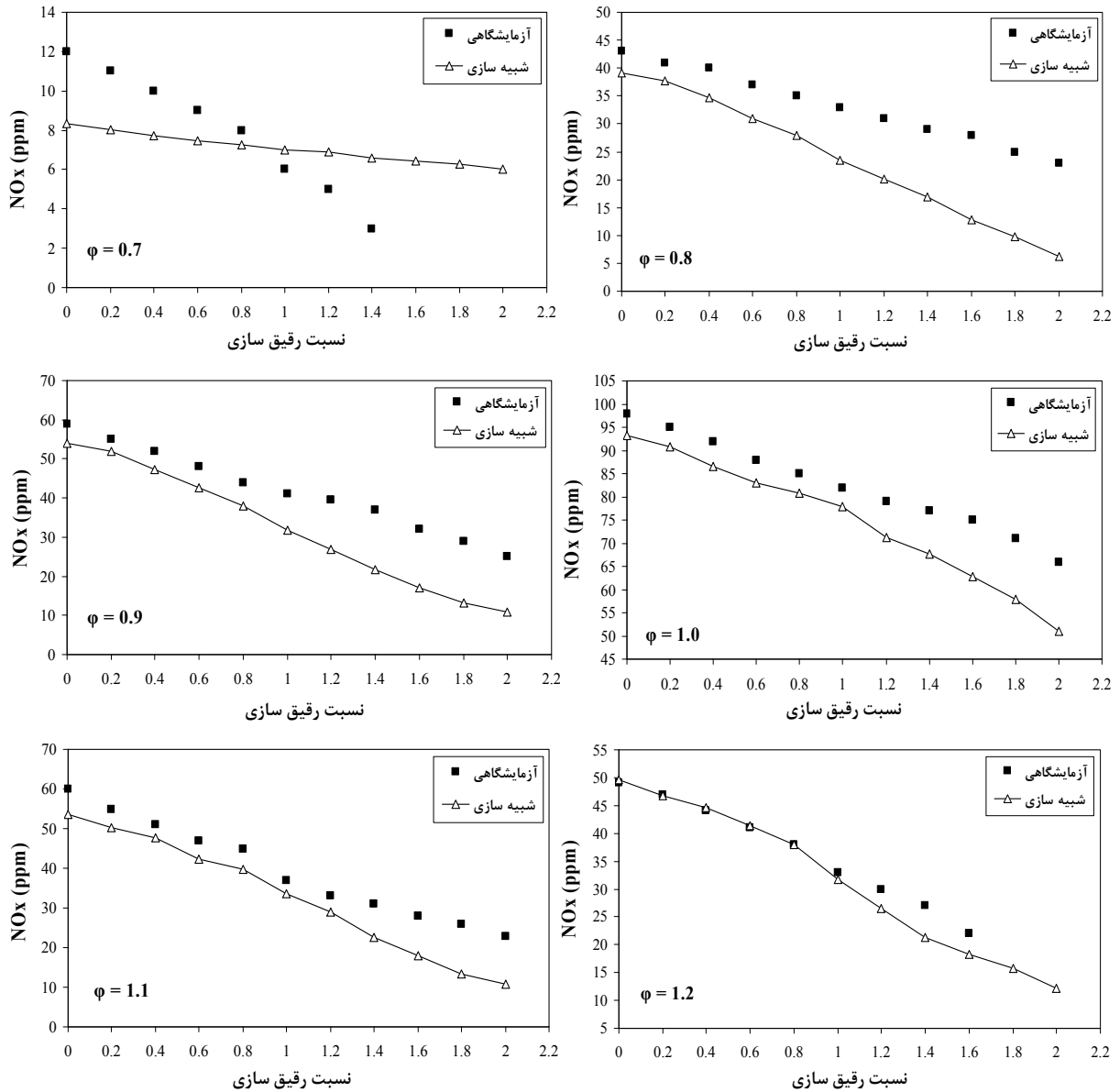
نسبت هم‌ارزی، میزان انتشار NO_x کاهش پیدا می‌کند. دلیل این تغییر در میزان انتشار NO_x ، دمای محفظه احتراق و غلظت اکسیژن در مخلوط پیش‌آمیخته ورودی (در ناحیه رقیق‌سوز، $0/6$ تا $1/0$)، اگرچه کسر مولی اکسیژن کم می‌شود اما چون دما زیاد می‌شود، NO_x افزایش می‌یابد) و همچنین کاهش زمان اقامت به دلیل افزایش سرعت ورودی است. از آنجا که دما در معادله تشکیل NO گرمایی به صورت نمایی ظاهر می‌شود، مهم‌ترین متغیر در انتشار NO_x است [۱۴]. در ناحیه رقیق‌سوز با افزایش نسبت هم‌ارزی، غلظت اکسیژن و نیتروژن در مخلوط پیش‌آمیخته ورودی کاهش می‌یابد اما احتراق به سمت حالت استوکیومتری هدایت می‌شود که عاملی موثر در افزایش دمای بیشینه شعله است. همچنین در ناحیه رقیق‌سوز 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 نسبت هم‌ارزی $0/95$ ، میزان انتشار آلاینده NO_x به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با حرکت از حالت استوکیومتری به سمت ناحیه پرسوخت انتشار NO_x کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش در غلظت اکسیژن و نیتروژن موجود در مخلوط پیش‌آمیخته و همچنین کاهش دمای محفظه احتراق است.

در شکل (۶) نتایج آزمایشگاهی غلظت NO_x برحسب نسبت هم‌ارزی برای نسبت‌های رقیق‌سازی مختلف در شعله پیش‌آمیخته متان- هوا ارائه شده است. حضور رقیق‌کننده سبب افزایش ظرفیت گرمایی مخلوط و در نتیجه کاهش دمای شعله می‌شود و از آنجا که اصلی‌ترین عامل در تشکیل آلاینده NO_x (NO گرمایی) دماست، با کاهش دمای محفظه احتراق میزان انتشار آلاینده NO_x نیز کاهش می‌یابد. تمامی عواملی که سبب کاهش دمای بیشینه شعله و در نهایت کاهش دمای محفظه احتراق می‌شوند عواملی موثر بر کاهش انتشار NO_x محسوب می‌شوند. همچنین با کاهش کسر مولی اکسیژن، فشار جزئی آن نیز کاهش یافته که بر روی سینتیک بنیادی واکنش NO_x اثر گذاشته و نرخ تولید آن را کاهش می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود، با افزایش میزان گاز رقیق‌کننده، انتشار NO_x کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان از طریق روزهایی که بر روی بدنه کوره تعبیه شده است به صورت تجربی شعله را مشاهده کرد. در نسبت هم‌ارزی $0/6 = \varphi$ ، با نسبت رقیق‌سازی $0/8 = \beta$ ، و در نسبت هم‌ارزی $0/7 = \varphi$ ، با نسبت رقیق‌سازی $1/6 = \beta$ ، با توجه به خاموشی شعله مقادیر آزمایشگاهی به دست نیامده است. علت این است که چون در حالت رقیق‌سوز، کسر مولی سوخت در مخلوط کم است، با افزودن رقیق‌ساز N_2 ، کسر مولی سوخت در مخلوط کمتر از مقدار سوخت مورد نیاز برای شکل‌گیری احتراق بوده و شعله خاموش می‌شود. همچنین در نسبت هم‌ارزی $1/2 = \varphi$ ، با نسبت رقیق‌سازی $1/7 = \beta$ ، در نسبت هم‌ارزی $1/3 = \varphi$ ، با نسبت رقیق‌سازی $1/55 = \beta$ و در نسبت هم‌ارزی $1/4 = \varphi$ ، با نسبت رقیق‌سازی $1/4 = \beta$ ، چون هوای کافی برای احتراق وجود ندارد، شعله دچار خاموشی می‌شود.



شکل ۶- تاثیر رقیق‌سازی با رقیق‌ساز N_2 بر انتشار آلاینده NO_x (آزمایشگاهی)

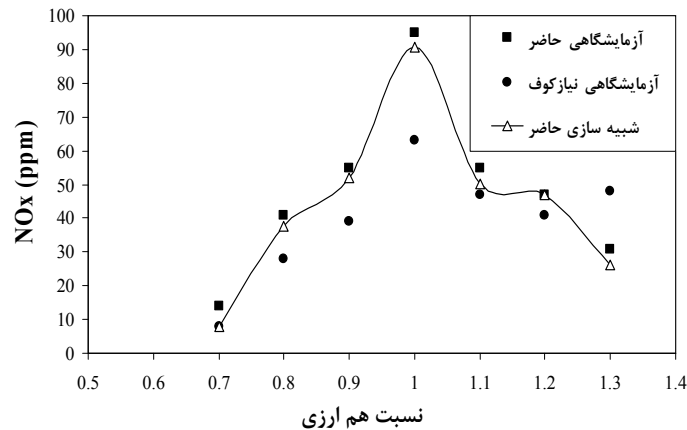
شکل (۷)، نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی غلظت NO_x برحسب نسبت رقیق‌سازی در محدوده نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۷ تا ۱/۲ شامل نواحی رقیق‌سوز، استوکیومتری و پرسوخت را نشان می‌دهد.



شکل ۷- تاثیر رقیق‌ساز N_2 بر انتشار آلاینده NO_x در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف و در محدوده‌ای از نسبت‌های رقیق‌سازی و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، انتشار آلاینده NO_x با افزایش نسبت رقیق‌سازی کاهش یافته است. رقیق‌سازی با N_2 ، به دلیل افزایش ظرفیت گرمایی مخلوط و همچنین انرژی فعال‌سازی بالای مولکول نیتروژن به دلیل داشتن پیوند سه‌گانه، افزایش سرعت مخلوط ورودی (به دلیل افزایش دبی ورودی و ثابت ماندن قطر لوله ورودی) و در نتیجه کاهش زمان اقامت از دلایل کاهش دمای شعله و در نهایت کاهش انتشار آلاینده NO_x هستند. به دلیل مشاهده عینی خاموشی شعله، در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۷ و ۱/۲ مقادیر آزمایشگاهی موجود نیستند.

در شکل (۸)، به مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی نیازکوف و همکارانش [۳۱]، که بر روی تاثیر رقیق سازی بر انتشار آلاینده NO_x در شعله پیش آمیخته متان- هوای رقیق شده با N_2 در محدوده نسبت های هم ارزی ۰/۷ تا ۱/۳، و با نسبت رقیق سازی $\beta = 0/2$ صورت گرفته، پرداخته شده است. نیازکوف و همکارانش برای آنالیز گازهای خروجی از آنالیزور گاز مدل Fisher Rosemount Model 51A NO/NO_2 استفاده کرده اند.



شکل ۸- مقایسه تاثیر رقیق ساز N_2 بر NO_x انتشار یافته در محدوده ای از نسبت های هم ارزی و نسبت رقیق سازی $\beta = 0/2$ با نتایج آزمایشگاهی نیازکوف و همکارانش [۳۱]

نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی حاضر توافق بسیار خوبی را نشان می دهند. همچنین نتایج به دست آمده، روند خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نیازکوف و همکارانش نشان می دهند. علی رغم اینکه تشکیل NO_x مستقل از ابعاد کوره است (در صورتی که انتشار CO_2 و به ویژه CO متاثر از شکل کوره است) [۳۲]، در بعضی نسبت های هم ارزی اختلاف نتایج قابل ملاحظه است.

نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر رقیق سازی بر روی تولید NO_x به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. نتایج نشان می دهند:

- با رقیق سازی سوخت، دمای محفظه احتراق به دلیل افزایش ظرفیت گرمایی مخلوط و کاهش غلظت اکسیژن، کاهش می یابد.
- بیشترین غلظت NO_x در شعله پیش آمیخته متان- هوا بدون اعمال رقیق سازی، در نسبت هم ارزی ۰/۹۵ اتفاق می افتد.
- نتایج آزمایشگاهی رقیق سازی با N_2 در حالت استوکیومتری نشان می دهد که به ازای $\beta = 0/2$ ، میزان انتشار آلاینده NO_x نسبت به حالت بدون رقیق سازی ($\beta = 0$)، ۳۹ درصد کاهش می یابد. همچنین نتایج شبیه سازی در $\phi = 1/0$ نیز کاهش ۴۵ درصدی انتشار NO_x را نسبت به حالت بدون رقیق سازی پیش بینی می کند.
- نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی در نسبت هم ارزی ۱/۰ (حالت استوکیومتری) و نسبت های هم ارزی بالاتر (حالت پرسوخت)، توافق بسیار خوبی را نشان می دهند.
- نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی در نسبت رقیق سازی $\beta = 0/2$ ، تطابق بسیار خوبی را نشان می دهند. همچنین نتایج به دست آمده روند خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نیازکوف و همکارانش نشان می دهند.
- نتایج آزمایشگاهی رقیق سازی با N_2 ، در محدوده نسبت های هم ارزی ۰/۷ تا ۱/۳، به طور متوسط ۵۶ درصد کاهش انتشار NO_x را نسبت به حالت بدون رقیق سازی نشان می دهد. همچنین نتایج شبیه سازی نیز به طور میانگین و در محدوده نسبت های هم ارزی ذکر شده کاهش ۶۷ درصدی انتشار NO_x را نسبت به حالت بدون رقیق سازی پیش بینی می کند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه آزاد اسلامی مشهد که با حمایت مالی امکان ساخت دستگاه آزمایشگاهی را فراهم کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- Bell, S. R., and 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.
- Schefer, R. W., Wicksall, D. M., and Aggarwal, S. K., "Combustion of Hydrogen-Enriched Methane in a Lean Premixed Swirl-Stabilized Burner," *Proc. of the 29th Symposium (International) on Combustion*, pp. 843-851, 2002.
- Hill, S. C., and Smoot, L. D., "Modelling of Nitrogen Oxides Formation and Destruction in Combustion System", *Prog. Energy Combustion Science*, 26, pp. 417-458, 2000.
- Zeldovich, Y. A., *Oxidation of Nitrogen in Combustion*, Academy of Sciences of USSR, Institute of Chemical Physics, Moscow-Leningrad, 1947.
- Pershing, D. W., and Wendt, J. O. L., "Relative Contributions of Volatile Nitrogen and Char Nitrogen to NO_x Emissions from Pulverized Coal Flames," *Ind. Eng. Chem. Proc. Design and Dev.*, 18, NO. 60, 1979.
- Ren, J. Y., Qin, W., Egolfopoulos, F. N., and Tsotsis, T. T., "Strain-Rate Effects on Hydrogen-Enhanced Lean Premixed Combustion," *Combustion and Flame*, 124, pp. 717-720, 2001.
- Rortveit, G. J., Zepter, K., Skreiberg, O., Fossum, M., and Hustad, J. E., "A Comparison of Low-NO_x Burners For Combustion of Methane and Hydrogen Mixtures," *Proc. of the Combustion Institute*, 29, pp. 1123-1129, 2002.
- Ghoniem, A. F., Annaswamy, A., Park, S., and Sobhani, Z. C., "Stability And Emissions Control Using Air Injection And H₂ Addition in Premixed Combustion," *Proc. of the Combustion Institute*, 30, NO. 2, pp. 1765-1773, 2005.
- Yamaoka, I., and Tsuji, H., "Anomalous Behavior of Methane-Air and Methane-Hydrogen-Air Flames Diluted with Nitrogen in a Stagnation Flow," *Combustion Inst., Pittsburgh*, pp. 145-152, 1992.
- Wierzba, I., and Ale, B. B., "Rich Flammability Limits of Fuel Mixtures Involving Hydrogen at Elevated Temperatures," *International Journal of Hydrogen Energy*, 25, pp. 75-80, 2000.
- Jackson, G. S., Sai, R., Plaia, J. M., Boggs, C. M., and Kiger, K. T., "Influence of H₂ on Response of Lean Premixed CH₄ Flames to High Strained Flows," *Combustion and Flame*, 132, pp. 503-511, 2003.
- Liuzzo, G., Verdone, N., and Bravi, M., "The Benefits of Flue Gas Recirculation in Waste Incineration," *waste management*, 27, pp. 106-116, 2007.
- Warnats, J., Mass, U., and Dibble, R. W., *Combustion*, Springer, 2000.
- Lazic, L., Varga, A., and Kizek, J., "An Experimental Study of the Influence of FGR on NO_x Formation," *Material in Technology*, 38, pp. 31-38, 2004.
- Littlejohn, D., Majeski A. J., Tonse, S., and Castaldini, C., "Laboratory Investigation of an Ultralow NO_x Premixed Combustion Concept For Industrial Boilers," *Proc. of The Combustion Institute*, 29, pp. 1115-1121, 2002.
- Ho keun kim, and Yongomo kim, "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.
- Cho, E. S. and Chung, S. H., "Characteristics of NO_x Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides," *KSME* 12, pp. 2303-2309, 2004.
- Dally, B. B., Riesmeier, E., and Peters, N., "Effect of Fuel Mixture on Moderate and Intense Low Oxygen Dilution Combustion," *Combustion and Flame*, 137, pp. 418-431, 2004.
- Salvador, S., Kara, Y., and 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.
- Cho Eun-Seong, Chung Suk Ho, "Numerical Study on NO_x Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides," *Journal of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.)*, 19, No. 6, pp. 1358-1365, 2005.
- Giles, D. E., Som, S., and Aggarwal, S. K. "NO_x Emission Characteristics of Counterflow Syngas Diffusion Flames with Airstream Dilution," *Fuel*, 85, pp. 1729-1742, 2006.
- Prathap, C., Ray, A., and Ravi, M. R., "Investigation of Nitrogen Dilution Effects on the Laminar Burning Velocity and Flame Stability of Syngas Fuel at Atmospheric Condition," *Combustion and Flame*, 155, pp. 145-160, 2008.
- Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A., "CHEMKIN II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," Sandia National Laboratories Report No, SAND 89-8009, 1989.
- Deuflhard, P., "Newton Methods for Nonlinear Problems. Affine Invariance and Adaptive Algorithms," *Computational Mathematics*, 35, Springer, 2004.
- Bowman, C. T., Davidson, D. F. H., Gradiner, W. C., Lissanski, V. Jr., Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., and Goldenberg, M., <http://www.me.berkeley.edu/gri-mech>
- Deuflhard, P., and Bornemann, F., *Scientific Computing with Ordinary Differential Equations*, Texts in Applied Mathematics, 42, Springer, 2002.
- Peters, N., "Flame Calculation with Reduced Mechanism," *Combustion Science and Technology*, 34, pp. 98-112, 1983.
- Turns, S. R., *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, Mc GrawHill, 2000.

29. Kee, R. J., Grear, J. F., Smooke, M. D., and Miller, J. A., "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One - Dimensional Premixed Flames," Sandia Technical Report SAND 85, 8240, 1985.
30. Cecile Cohe, Christian Chauveau, Iskender Gokalp, and Dilek Funda Kurtulus, "CO₂ Addition and Pressure Effects on Laminar and Turbulent Lean Premixed CH₄-air Flames," Proceedings of the Combustion Institute, 32 , pp. 1803-1810, 2009.
31. Knyazkov, D. A., Shmakov, A. G., Dyakov, I., Korobeinichev, O. P., De Ruyck, J., and Konnov, A. A., "Formation and Destruction of Nitric Oxide in Methane Flames Doped with NO at Atmospheric Pressure," Proceedings of the Combustion Institute, 32, pp. 327-334, 2009.
32. Cheng, R. K., Yegian, D. T., Miyasato, M. M., Samuelsen, G. S., Benson, C. E., Pellzzari, R. and Loftus, P., "Scaling and Development of Low-Swirl Burners for Low Emission Furnaces and Boilers," Proceeding of Combustion Institute, 28, pp. 1305-1313, 2000.

English Abstract

Experimental and Numerical Study of N₂ Dilution on NO_x Emission in Methane-Air Premixed Flames

M. Mahmoodi Arya and H. Momahedi Heravi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University–Mashhad Branch

Dilution is one of the ways to reduce maximum temperature in the combustion chamber, which in turn leads to a reduction in the formation of thermal NO. The methods to control NO_x formation are all based on temperature control and/or reduction in oxygen concentration. In the present paper, the numerical and experimental studies aim to examine the effect of N₂ dilution on the formation of the pollutant NO_x in the premixed flame of methane-air in the combustion chamber. The experimental results were obtained by designing a furnace with a cylindrical combustion chamber which was asymmetrical. The experiments were conducted with the equivalence ratios 0.7 to 1.3 and various dilution ratios. Combustion simulation was studied using the Premix code of the CHEMKIN II version and various N₂ dilution ratios within a range of equivalence ratios. The experimental and simulation results indicated that by increasing the ratio of dilution, maximum temperature of the flame and emission of the pollutant NO_x from the combustion chamber decreases. The experimental and simulation results are also in good agreement and the trends of the obtained results conform with the experimental results of Knyazkov et al.

Keywords: NO_x, Dilution, Simulation, Experimental, Premix