



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۴۱ تا ۵۰
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 41-50



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک
AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
(ASJR-ME)

بررسی آزمایشگاهی تأثیر رقیق‌سازی و چرخش هوا بر تشکیل آلاینده NO_x در شعله پیش‌آمیخته پروپان - هوا

محمد محمودی آریا^{۱*}، افشین فهیمی راد^۲، پیمان بازیار^۳، حمید ممهدی هروی^۴

- ۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد
- ۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، بخش توسعه و تحقیق، کارخانه دیزل سنگین ایران (دسا)
- ۳- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علمی کاربردی فذا
- ۴- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

(دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۱۳، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۴)

چکیده

واکنش تشکیل NO حرارتی بشدت به دما حساس بوده و اگر روشی موجب کاهش دمای شعله شود عاملی مؤثر برای کاهش این آلاینده به حساب می‌آید. رقیق‌سازی سوخت و همچنین ایجاد جریان چرخشی از روش‌های مؤثر در کاهش دمای محفظه‌ی احتراق محسوب شده که کاهش تولید NO حرارتی را در پی دارند. در تحقیق حاضر، هدف مطالعه آزمایشگاهی تأثیر رقیق‌سازی و چرخش هوا بر تشکیل آلاینده NO_x در شعله چرخشی پیش‌آمیخته پروپان - هوا در محفظه‌ی احتراق است. نتایج آزمایشگاهی با ساخت کوره‌ای با محفظه‌ی احتراق استوانه‌ای و دارای تقارن محوری بدست آمده است. به منظور ایجاد جریان چرخشی نیز از چرخنده‌ای با هندسه‌ی خاص که زاویه آن 45° درجه و عدد چرخش متناظر با آن 0.7 می‌باشد، استفاده شده است. آزمایش‌ها بر روی محدوده‌ی نسبت‌های هم‌ارزی $(1/3 - 0.7)$ و دامنه‌ی نسبت‌های رقیق‌سازی $(0.2 - 0.1)$ صورت گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت رقیق‌سازی دمای شعله و در نتیجه انتشار آلاینده NO_x از محفظه‌ی احتراق کاهش می‌یابد. علاوه بر این نتایج بیانگر این حقیقت می‌باشد که چرخنده موجب اختلاط بهتر سوخت، هوا و رقیق‌کننده شده و همچنین سبب می‌شود مقداری از محصولات احتراق که در ابتدای شعله شکل گرفته بازگردانده شده و مجدداً وارد ناحیه‌ی واکنش با هیدروکربن‌ها شود. از آنجاکه گونه‌های موجود دارای ظرفیت حرارتی بالایی می‌باشند، حرارت ناشی از احتراق را جذب کرده و مجموع این عوامل سبب کاهش آلاینده NO_x می‌شوند. نتایج آزمایشگاهی با نتایج دیگر محققان مقایسه شده و روند قابل قبولی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی:

رقیق‌سازی، پیش‌آمیخته، نسبت هم‌ارزی، نسبت رقیق‌سازی، عدد چرخش، NO_x

۱- مقدمه

در این رابطه، K_1 و K_2 ثابت‌های سینتیکی واکنش، t زمان و T دما است، همچنین کروشه، $([])$ ، نشان دهنده غلظت می‌باشد.

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

بدلیل اینکه دمای بالای شعله سبب شکستن پیوند سه گانه مولکول نیتروژن موجود در هوا و ترکیب آن با اکسیژن موجود در آن می‌شود، تولید NO حرارتی بشدت به دما حساس است. در معادله ی تشکیل NO، دما بصورت تابعی نمایی نقش دارد و از آنجا که در دماهای بالاتر از ۱۷۰۰ کلوین به ازای هر ۴۰ درجه افزایش دما، تولید NO دو برابر می‌شود و همچنین بدلیل انرژی فعال سازی بالای مکانیزم تشکیل NO، اگر روشی موجب کاهش دمای شعله شود، عاملی مؤثر جهت کاهش تشکیل NO_x است [۷۶].

نیاز فزاینده جهان به انرژی، محدود بودن منابع، کاهش چشمگیر سوخت‌های فسیلی و همچنین مشکلات زیست‌محیطی ناشی از احتراق این سوخت‌ها موجب شده تا طراحی سیستم‌های احتراقی تمیز با بازده بالا مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و طراحان سیستم‌های احتراق قرار گیرد. از طرفی آثار سوء و مخرب آلاینده‌های حاصل از احتراق بر محیط‌زیست سبب شده است نیاز به اعمال تمهیداتی برای کنترل و کاهش این آلاینده‌ها ضروری به نظر آید. اعمال فرآیندهای حین‌احتراقی از قبیل احتراق مرحله ای، ایجاد جریان چرخشی، بازگرداندن گازهای خروجی به محفظه ی احتراق و همچنین رقیق‌سازی از راه کارهای مهم جهت کاهش دمای محفظه‌ی احتراق و بالطبع کاهش آلاینده NO_x بحساب می‌آیند. ایجاد جریان چرخشی راهکاری است که در آن با تعبیه یک چرخنده در مسیر و چرخش جریان سبب پایداری شعله شده و با اختلاط بهتر سوخت و هوا باعث بهبود شرایط احتراق می‌گردد. از دیگر دلایل استفاده از چرخنده، نقش کلیدی آن در جلوگیری از پس زنی احتمالی شعله بخصوص در حالت شعله پیش‌آمیخته می‌باشد [۹۸].

رقیق‌سازی نیز بعنوان یک خط‌مشی جهت دستیابی به انتشار NO_x کمتر در بسیاری از مقالات مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. این اصل بر گسترش حدود اشتعال‌پذیری به سمت شرایط کم‌سوخت (فقیر) استوار است که کاهش قابل‌توجه اکسیدهای نیتروژن را به همراه دارد [۱۲-۱۰]. رقیق‌سازی روشی است که با افزودن یک رقیق‌کننده (که عموماً ظرفیت‌حرارتی بالایی دارد)، ظرفیت‌حرارتی مخلوط را زیاد کرده و با افزایش توانایی جذب حرارت از کوره، دمای محفظه‌ی احتراق را کاهش داده که در نهایت باعث کاهش انتشار آلاینده NO_x می‌شود [۱۳]. از جمله رقیق‌کننده‌هایی که سبب رقیق‌سازی مخلوط و کاهش غلظت اکسیژن می‌شوند عبارتند از: CO₂ و N₂ که ظرفیت‌حرارتی بالایی این گونه‌ها (ظرفیت حرارتی CO₂ و N₂ به ترتیب برابر ۲,۹ KJ/Kg.K و ۱,۰۴۲ KJ/Kg.K می‌باشد) سبب افزایش ظرفیت‌حرارتی مخلوط و درنهایت کاهش

از زمان برپایی آتش، آلودگی هوا همواره تهدیدی جدی به شمار آمده و در دوره های مختلف به جنبه های متفاوتی از آن اهمیت داده شده است. در مقیاس کوچک نظیر شهرها، آلودگی از منظر ایجاد بیماری های خطرناک و از دیدگاه جهانی به لحاظ آثار سوء بر محیط زیست و مسائلی چون تخریب لایه اُزن و گرمایش زمین و پیامدهای آن بر اکوسیستم و در نهایت انسان، مورد مطالعه قرار گرفته است. منشاء آلودگی هوا در اوایل انقلاب صنعتی عمدتاً صنایع و سوخت زغال‌سنگ بوده ولی امروزه منشاء این آلودگی در شهرها حمل و نقل درون شهری می‌باشد. 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].

هنگامی که سوخت‌های فسیلی از قبیل گاز طبیعی، نفت و یا ترکیبات مشتق شده از آنها در هوا می‌سوزند، محصولات اکسیداسیون شامل: CO₂، CO و H₂O تشکیل می‌شوند، علاوه بر این 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)، دی اکسید نیتروژن (NO₂) و اکسید نیتروس (N₂O) می‌باشند که مجموع NO و NO₂ بعنوان NO_x شناخته می‌شود [۳].

مکانیزم های زیادی برای تشکیل NO_x در احتراق سوخت‌های گازی مطرح شده که مهمترین آنها عبارتند از: مکانیزم NO گرمایی یا حرارتی (Thermal NO)، مکانیزم NO فوری (Prompt NO)، مکانیزم N₂O واسطه‌ای و مکانیزم NO سوخت (Fuel NO). مکانیزم NO گرمایی مهمترین مکانیزمی است که تاکنون شناخته شده است. این مکانیزم برای اولین بار توسط زلدوویچ در سال ۱۹۴۶ [۴] مطرح شد. دما و غلظت بالای اکسیژن از عوامل مهم در این مکانیزم بوده و تقریباً در اکثر فرآیندهای احتراقی مطرح می‌باشند. این مکانیزم توسط سه واکنش اساسی زیر، با عنوان مکانیزم زلدوویچ توسعه یافته بیان می‌گردد:



تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مولکول نیتروژن (N₂) نیازمند شکسته شدن پیوند قوی بین اتم های نیتروژن است و همین امر موجب وابستگی شدید این مکانیزم به درجه حرارت می‌گردد. این واکنش‌ها بعنوان واکنش‌های تشکیل NO حرارتی نیز نامیده می‌شوند، زیرا واکنش (۱-الف) بعلت پیوند سه گانه قوی در مولکول N₂ دارای انرژی فعال سازی بسیار بالایی بوده و لذا فقط در دماهای بالا واکنش سریع انجام می‌گیرد، در غیر اینصورت واکنش اول، محدود کننده تشکیل NO حرارتی است. به منظور محاسبه غلظت NO حرارتی از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۵].

هر منطقه در داخل شعله کاهش یابد که نشان می دهد اکسیداسیون هیدروکربن کاهش یافته و دمای موضعی شعله را کم می کند. علاوه بر این نتایج بدست آمده نشان می دهد که رقیق سازی با کاهش NO_x همراه بوده و این درحالی است که هیچ افزایشی در میزان CO مشاهده نشده و کارکرد بهتر مشعل را نیز در پی دارد. چو و چانگ [۲۲] نیز در همان سال در دانشگاه ملی سئول بر روی رقیق سازی با CO_2 و N_2 تحقیقاتی را صورت دادند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که هر دو گونه در کاهش NO_x مؤثر بوده ولی رقیق کننده CO_2 بعلت داشتن ظرفیت حرارتی بالاتر در مقایسه با N_2 در کاهش NO_x مؤثرتر است. کوره مورد استفاده در این آزمایش یک محفظه به ابعاد $250 \times 250 \times 600$ میلیمتر می باشد که به ضخامت ۲۵ میلیمتر عایق بندی شده است.

در سال ۲۰۰۸، کومار و میشرا [۲۳]، بر روی رقیق سازی جت پخشی شعله گاز مایع با رقیق کننده N_2 تحقیقاتی انجام دادند. نتایج نشان داد که طول شعله با افزودن رقیق کننده بی اثر N_2 زیاد شده که بعلت کاهش ضریب پخش در اثر کاهش دمای شعله می باشد. همچنین ضریب تشعشع با افزودن N_2 بتدریج کاهش می یابد. شاخص انتشار NO_x و CO_2 با افزودن N_2 بطور یکنواخت کاهش می یابد که می توان با کاهش زمان اقامت مخلوط گازی توصیف کرد. در همان سال پارک و همکارانش [۲۴] نیز تحقیقاتی را بر روی تأثیر افزودن CO_2 بر شعله پخشی متان آزمایش هایی را انجام دادند. نتایج نشان داد که افزودن CO_2 باعث کاهش دمای شعله شده که بعلت اثرات شیمیایی و گرمایی CO_2 می باشد.

در سال ۲۰۱۱ بوید فاکلر و همکارانش [۲۵]، تحقیقاتی را بر روی انتشار آلاینده NO_x از شعله پیش آمیخته کم سوخت گاز طبیعی مخلوط شده با CO_2 و N_2 انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که انتشار NO_x بعنوان تابعی از رقیق سازی سوخت پیروی می کند.

در تحقیقات صورت گرفته، آزمایش ها بر روی دامنه محدودی از نسبت های هم آرزوی و یا رقیق سازی صورت گرفته اند. از این رو تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر چرخش جریان و همچنین رقیق سازی سوخت بر تشکیل آلاینده NO_x در احتراق چرخشی پیش آمیخته پروپان - هوا بر روی دامنه ی نسبتاً وسیعی از نسبت های هم آرزوی و رقیق سازی انجام گرفته است. به منظور تعیین میزان اثربخشی چرخش جریان و رقیق سازی سوخت بر انتشار آلاینده NO_x ، از یک کوره آزمایشگاهی و چرخنده ای که بدین منظور طراحی و ساخته شده استفاده گردیده است.

۲- آزمایش

برای انجام آزمایش ها به منظور بررسی تأثیر چرخش جریان و رقیق سازی سوخت بر تشکیل آلاینده NO_x ، کوره ای طراحی و ساخته شده است. بدنه اصلی محفظه ی احتراق را لوله فولادی AISI 316 توخالی به قطر ۱۰۵ میلیمتر و طول ۱۰۰۰ میلیمتر تشکیل می دهد که قابلیت تحمل دماهای بالا را دارد. قطر ورودی سوخت، هوا و رقیق کننده برابر ۳۵ میلیمتر، دمای ورودی ۳۰۰ کلوین و فشار هوا برابر ۱ اتمسفر می باشد. هوای مورد نیاز

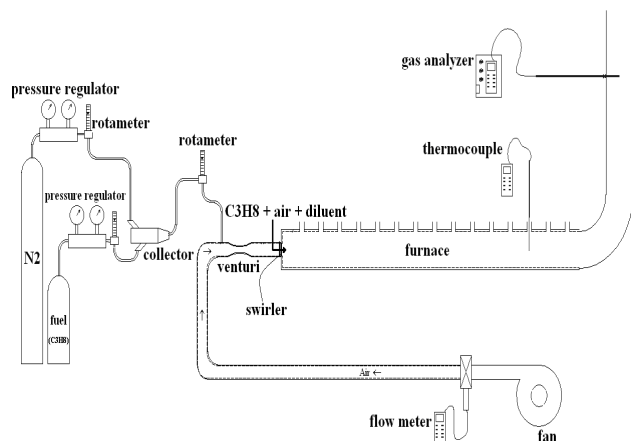
NO_x تولیدی می شود [۱۴]. رقیق کننده های دیگر مورد استفاده عبارتند از: H_2O ، H_2 ، CO ، Ar ، He ، NO ، که هریک بنحوی منجر به کاهش انتشار آلاینده NO_x می شوند [۱۰، ۱۱ و ۱۵].

پژوهش های زیادی در زمینه رقیق سازی سوخت و همچنین ایجاد جریان چرخشی به منظور کاهش آلاینده های ناشی از احتراق صورت گرفته است. اولین اقدامات در زمینه مطالعه و بررسی احتراق جریان های چرخشی در سال ۱۹۷۴ توسط سایرد و بی پر [۱۶] صورت گرفت. اغلب تحقیقات اخیر بر روی رفتار محفظه ی احتراق چرخشی و تأثیر چرخش بر تشکیل آلاینده NO_x می باشد که اولین بار در سال ۱۹۸۴ توسط گوپتا، لالی و سایرد [۱۷] مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۲۰۰۱، چاوو و همکارانش [۱۸]، تحقیقاتی را بر روی تأثیر احتراق پیش آمیخته بر انتشار آلاینده ها در شعله چرخشی متان - هوا انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که با افزایش میزان پیش آمیختگی مرئیت شعله کاهش یافته و رنگ سراسر شعله از زرد به آبی تغییر می کند. همچنین مشاهده می شود که ساختار شعله با افزایش میزان پیش آمیختگی بتدریج باریک شده و دما افزایش پیدا می کند. علاوه بر این با افزایش پیش آمیختگی میزان انتشار NO_x و CO کاهش پیدا خواهد کرد.

پیرو همین تحقیقات در سال ۲۰۰۴، آلدوسوق و همکارانش [۱۹]، تحقیقاتی را بر روی محفظه ی احتراق دارای مشعل چرخشی و با سوخت گاز طبیعی انجام دادند. آزمایش ها در عدد چرخش ۰/۸۲ صورت گرفته اند. نتایج بدست آمده نشان می دهند که چرخش بر روی آلاینده ها، (بخصوص NO_x)، تأثیر زیادی داشته و با افزایش شدت چرخش در تمامی نسبت های هم ارزی، میزان انتشار NO_x کاهش پیدا کرده است. در همان سال دالی و همکارانش [۲۰] در سال ۲۰۰۴ در دانشگاه آدلاید استرالیا، تحقیقاتی را بر روی رقیق سازی احتراق با CO_2 و N_2 انجام دادند. کوره طراحی شده یک محفظه به ابعاد 250×250 میلیمتر و ارتفاع ۴۸۵ میلیمتر بوده که شش پنجره از جنس کوارتز به منظور مشاهده شعله بر روی آن تعبیه شده است. نتایج این تحقیقات نشان می دهد که رقیق سازی با N_2 و CO_2 ، انتشار NO_x را کاهش داده و باعث می شود که شعله در داخل کوره نامرئی به نظر آید. علاوه بر این رقیق سازی با گازهای بی اثر سبب می شود کسر مخلوط استوکیومتری^۲ (نسبت هم ارزی ۱/۰) به سمت ناحیه ی پُرسوخت^۳ (غنی) منتقل شده که این امر کاهش انتشار NO_x را در پی دارد. در ادامه، سالوادور و همکارانش [۲۱]، بر روی رقیق سازی گاز طبیعی با هوا و N_2 تحقیقاتی را انجام دادند. سطح مقطع کوره طراحی شده 320×360 میلیمتر و طول آن ۳ متر در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که افزودن هوا باعث کاهش حدود ۳۰٪ در میزان انتشار NO_x می شود، درحالی که افزودن N_2 ، حدود ۶۰٪ میزان انتشار NO_x را کم می کند. در هر دو مورد در هر دو مورد افزودن هوا و N_2 ، کاهش NO_x را می توان این گونه توضیح داد که باعث پایین آمدن دمای آدیاباتیک شعله شده و موجب می شود کسر جرمی CH_4 در

2 Stoichiometry

3 Rich 3



شکل ۱: شمای کلی کوره طراحی شده و تجهیزات جانبی

به منظور اندازه‌گیری دبی هوا از دستگاه فلومتر مدل Lutron YK-2005 AM و برای اندازه‌گیری دبی حجمی سوخت از رواتر- SWPF- 06 A با محدوده ی اندازه‌گیری (۰-۴۰ lit/min) استفاده شده است. دقت سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه فلومتر ۰٫۱ m/S ~ ۰٫۰۵ و دقت دبی‌های اندازه‌گیری شده توسط رواتر ± ۰٫۰۲ lit/min می‌باشد. برای اندازه‌گیری دما از حس گر نوع R با قابلیت اندازه‌گیری دما تا ۱۹۰۰ کلوین استفاده شده است. دقت دماهای اندازه‌گیری شده توسط حس گر نوع R در محدوده ی °C (۰-۱۱۰۰) برابر ± ۱٫۰ °C و در محدوده ی °C (۱۱۰۰-۱۶۰۰) با استفاده از رابطه ی:

$$\pm [1 + 0.003 \times (T - 1100)]$$

بدست می‌آید. تمامی تجهیزات، پیش از انجام آزمایش‌ها کالیبره شده تا از بروز خطای احتمالی در داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده تا حد امکان جلوگیری شود.

۳- 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 بوده و برخی بعلت بروز اشتباه حین انجام آزمایش رخ می‌دهند. داده‌های غلط حاصل از اشتباهات واضح بلافاصله قابل شناسایی بوده و کنار گذاشته شده‌اند. ولی در مورد داده‌هایی که مشکوک هستند بسادگی 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 گردند. معمولاً خطاهای ثابت با کالیبره نمودن 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 بعنوان داده نهایی آزمایشگاهی استفاده می‌شود.

برای احتراق در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی توسط فن هوا که در پیچه‌ای به منظور تغییر دبی ورودی بر روی آن تعبیه شده تأمین می‌گردد. سوخت و رقیق‌کننده پس از اختلاط در کلکتور، با هوای ورودی مخلوط شده و به منظور اختلاط بهتر وارد یک ونتوری می‌شود. مخلوط سوخت، رقیق‌کننده و هوا پس از عبور از چرخنده از طریق لوله‌ای به قطر ۳۵ میلی‌متر وارد محفظه‌ی احتراق شده و با ایجاد جرقه، احتراق صورت می‌گیرد. وجود ونتوری و چرخنده در مسیر ورودی مخلوط پیش‌آمیخته، سبب جلوگیری از پس‌زنی احتمالی شعله خواهد شد. علاوه بر این عبور مخلوط ورودی ابتدا از ونتوری و سپس چرخنده سبب اختلاط کامل سوخت، رقیق‌کننده و هوا خواهد شد. جهت اختلاط بهتر سوخت و رقیق‌کننده، از یک کلکتور بهره گرفته شده است. دبی سوخت و رقیق‌کننده قبل از ورود به کلکتور اندازه‌گیری شده و سپس وارد آن می‌شوند. پس از طراحی کلکتورهای مختلف به منظور به حداقل رساندن اتلافات، کلکتور بهینه طراحی گردید که در آن طول شلنگ‌های اتصال کوتاه در نظر گرفته شده و ورودی سوخت و رقیق‌کننده تحت زاویه ی ۴۵ درجه وارد کلکتور می‌شوند. برای ایجاد هوای چرخشی از چرخنده مخصوصی استفاده شده است. چرخنده با الگو گرفتن از پخش کننده های شعله در مشعل‌های صنعتی و خانگی طراحی شده است. چرخنده مذکور با شکل دادن ورق آهنی به ضخامت ۰/۴ میلی‌متر توسط ماتریس و ایجاد پره ها با ابزار مخصوص به شکل و زاویه دلخواه طراحی و ساخته شده است. چرخنده دارای ۸ پره با زاویه ۴۵ درجه (زاویه نسبت به محور عمودی سنجدیده می‌شود) بوده و قطر میانی و خارجی آن به ترتیب برابر ۸ میلی‌متر و ۳۵ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به زاویه چرخنده و قطرهای ذکر شده عدد چرخش برای این چرخنده ۰/۷ بدست آمده است. با طراحی خاصی که در مسیر ورودی سوخت و هوا به محفظه ی احتراق انجام شده، چرخنده به راحتی در ورودی لوله جریان به داخل محفظه‌ی احتراق نصب شده است. محفظه‌ی احتراق از عایق پنبه‌بندی ۱۲۶۰ 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 یکدیگر بر بالای بدنه محفظه‌ی احتراق تعبیه شده است. لازم به ذکر است پس از رؤیت شعله روزنه ها مجدداً مسدود شده تا از ورود هوای اضافی به کوره و بروز خطای احتمالی جلوگیری شود. شمای کوره طراحی شده و تجهیزات جانبی آن، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. برای کاهش فشار داخل کپسول نیتروژن و رساندن آن از ۱۴۰ بار به میزان مطلوب از فشارسنج MORRIS با قابلیت تحمل فشار ورودی ۲۰۰ بار و توان تقلیل فشار تا ۱ بار استفاده شده تا با سوخت اصلی هم‌فشار شود. مقدار گونه‌های شیمیایی موجود در گازهای خروجی که آلاینده (NO_x، NO و NO₂)، هم جزئی از آنهاست توسط دستگاه آنالیز گاز مدل Testo 350 XL (با محدوده ی اندازه‌گیری ۰-۳۰۰۰ ppm) با قرار دادن حس گر مربوطه در لوله دودکش اندازه‌گیری می‌شود. دقت اندازه‌گیری‌ها برای غلظت‌های کمتر از ۱۰۰ ppm برابر ± ۵ ppm می‌باشد.

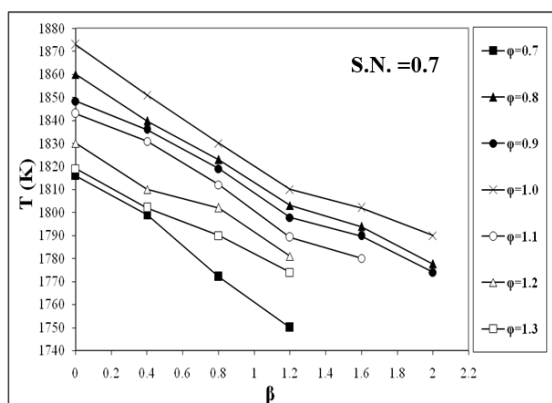
۴- نتایج

نتایج آزمایشگاهی برای نسبت‌های هم‌ارزی (ϕ)، در محدوده ی (۰/۷-۱/۳) و نسبت‌های رقیق‌سازی در دامنه ی (۰/۰-۲/۰) برای رقیق‌کننده N_2 صورت گرفته است. برای محاسبه نسبت رقیق‌سازی که با (β) معرفی می‌شود از رابطه (۵) استفاده شده است:

$$\beta = \frac{n_{Diluent}}{n_{Fuel}} \quad (5)$$

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

عدد چرخش (S.N.)، با استفاده از رابطه (۶) بدست می‌آید [۲۶]:
 $S.N. = \frac{r}{\theta}$ عدد چرخش، σ_r نسبت قطر میانی به قطر خارجی چرخنده و θ زاویه پره‌های چرخنده است، که عدد چرخش برای چرخنده ی ۴۵ درجه، ۰/۷ بدست آمده است. عدد چرخش یک پارامتر بی‌بعد بوده که معیاری برای چرخش جریان حول محور خود می‌باشد.
 شکل ۳، تأثیر رقیق‌سازی با N_2 بر دمای محفظه‌ی احتراق را در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۳: تأثیر رقیق‌کننده N_2 بر دمای محفظه‌ی احتراق در شعله چرخشی پیش آمیخته پروپان- هوا

همانگونه که از شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزودن N_2 به محفظه‌ی احتراق، دمای کوره کاهش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در نسبت هم‌ارزی ۱/۰، (مخلوط استوکیومتری)، دمای محفظه‌ی احتراق نسبت به سایر نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر است که بدلیل احتراق در حالت استوکیومتری و حضور اکسیژن لازم جهت اکسیداسیون کامل سوخت می‌باشد. بعلاوه حضور گاز N_2 موجود در مخلوط ورودی، ظرفیت حرارتی مخلوط افزایش می‌یابد که موجب جذب حرارت ناشی از احتراق و در نتیجه کاهش دمای شعله و محفظه‌ی احتراق خواهد شد. شکستن پیوند سه‌گانه مولکول نیتروژن واکنشی‌گرماگیر بوده که گرمای مورد نیاز جهت شکستن این پیوند سه‌گانه را از شعله دریافت کرده و سبب کاهش دمای شعله خواهد شد.

خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده‌ها از فرمول (۳) محاسبه می‌شود:

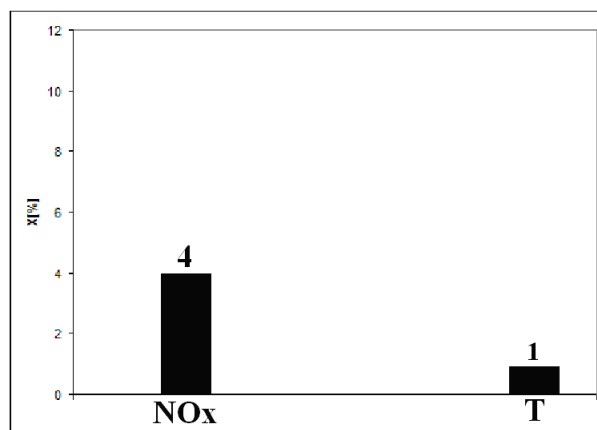
$$\sigma_m = \frac{\sigma}{n^{0.5}} \quad (3)$$

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

درصد عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی، ($X\%$)، نیز از رابطه (۴) محاسبه شده است:

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

که در آن، \bar{x} مقدار میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در شکل ۲، مقدار میانگین عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی را در خروجی کوره نشان داده شده است.



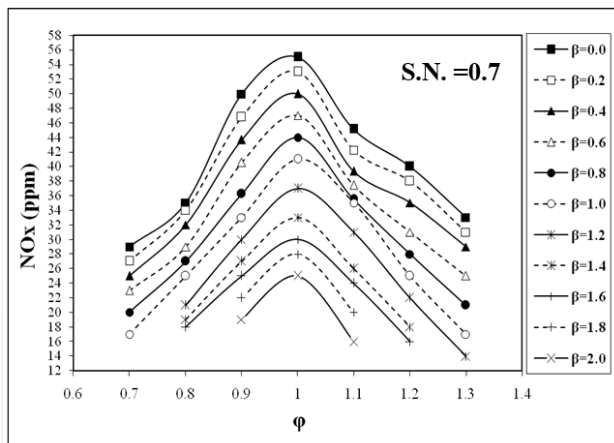
شکل ۲: مقادیر میانگین عدم قطعیت در شعله چرخشی پروپان- هوای رقیق شده با N_2 در محدوده نسبت‌های هم‌ارزی (۰/۷-۱/۳)، دامنه نسبت‌های رقیق‌سازی (۰/۰-۲/۰) و عدد چرخش ۰/۷

در یک مرحله آزمایش، یعنی در یک نسبت هم‌ارزی و رقیق‌سازی در حالت پایدار، دما و NO_x در نقاط مشخصی که به خوبی آب بندی شده اند اندازه‌گیری می‌شود. هر آزمایش چهار بار تکرار شده تا حتی المقدور از بروز خطا در نمونه‌گیری و ثبت داده‌های آزمایشگاهی جلوگیری شود. در هر مرحله، ممکن است اندکی اختلاف مشاهده شود که از خصوصیات کارهای تجربی می‌باشد. این اختلاف ممکن است بدلیل خطای دستگاه ثبت داده‌های آزمایشگاهی، از کالیبره خارج شدن حس‌گرها و یا خطای اپراتور باشد. برای حصول اطمینان از صحت نتایج بدست آمده اعداد نامربوط حذف می‌شوند، بطور مثال اگر از چهار مقدار ثبت شده عددی غیرمنطقی باشد آن را کنار گذاشته و با استفاده از روابط بدست آمده درصد عدم قطعیت بدست می‌آید. همانطور که نتایج نشان می‌دهد داده‌های ثبت شده برای NO_x با $\pm 4\%$ قابل پذیرش و برای دمای کوره با $\pm 1\%$ قابل قبول می‌باشد. بعنوان مثال اگر در نتایج $NO_x = 100 \text{ ppm}$ ، این مقدار در محدوده ی (۹۶-۱۰۴ ppm) یعنی $100 \pm 4 \text{ ppm}$ خواهد بود.

هوا و رقیق‌کننده شده و مقداری از محصولات احتراق تشکیل شده در ابتدای شعله بازگردانده شده و مجدداً وارد واکنش با هیدروکربن‌ها می‌شوند و از آن جهت که گونه‌های موجود دارای ظرفیت حرارتی بالایی هستند، حرارت ناشی از احتراق را جذب کرده، که این دو عامل باعث کاهش NO_x می‌شوند. بطور کلی در چرخش، نوعی IFGR^۵ در نزدیکی ناحیه ی شعله ایجاد می‌شود. البته این پدیده در محفظه‌های احتراق مختلف متفاوت بوده و قطر محفظه‌ی احتراق بسیار مؤثر است. هندسه محفظه‌ی احتراق نیز بر روی شکل چرخش داخلی بواسطه قطرهای مختلف تأثیرگذار خواهد بود.

تمامی عواملی که سبب کاهش دمای شعله و در نهایت کاهش دمای محفظه‌ی احتراق شده اند عواملی مؤثر بر کاهش انتشار آلاینده 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.

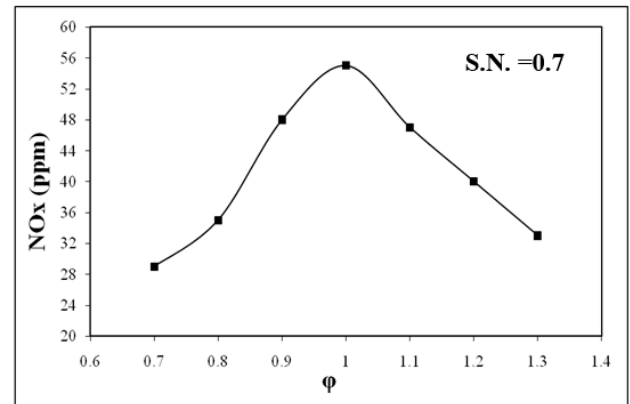
در شکل ۵، نتایج آزمایشگاهی میزان غلظت NO_x برحسب نسبت هم‌ارزی برای نسبت‌های رقیق‌سازی مختلف در شعله چرخشی پیش‌آمیخته پروپان - هوا ارائه شده است.



شکل ۵: تأثیر رقیق‌سازی با N₂ بر انتشار آلاینده NO_x در شعله چرخشی پیش-آمیخته پروپان - هوا

همانطور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان حضور رقیق‌کننده، انتشار NO_x کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان از طریق روزهایی که بر روی بدنه ی کوره تعبیه شده بصورت عینی شعله را مشاهده کرد. در جدول ۱ حدود خاموشی شعله نشان داده شده و بدین دلیل مقادیر آزمایشگاهی پس از آن نسبت رقیق‌سازی موجود نمی‌باشد. با توجه به جدول ۱ و مشاهده عینی شعله مشاهده می‌شود که در حالت کم‌سوخت بدلیل اینکه کسر مولی سوخت در مخلوط کم بوده و با افزودن رقیق‌کننده N₂، کسر مولی سوخت در مخلوط کمتر از مقدار سوخت مورد نیاز برای شکل‌گیری احتراق بوده و شعله خاموش می‌شود. همچنین مشخص گردید که در مخلوط پرسوخت بدلیل نبود هوای کافی جهت احتراق شعله دچار خاموشی می‌شود.

شکل ۴ نیز نتایج آزمایشگاهی تأثیر نسبت هم‌ارزی بر میزان انتشار آلاینده NO_x در شعله چرخشی پیش‌آمیخته پروپان - هوا بدون اعمال رقیق‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تأثیر نسبت هم‌ارزی بر انتشار آلاینده NO_x در شعله چرخشی پیش‌آمیخته پروپان - هوا بدون اعمال رقیق‌سازی

همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۷ تا نزدیک به حالت استوکیومتری، یعنی نسبت هم‌ارزی ۰/۹۵، میزان انتشار NO_x روندی صعودی را طی کرده و بعد از این مقدار بیشینه، با ورود به ناحیه ی پرسوخت (غنی)، $\phi > 1.0$ ، با افزایش نسبت هم‌ارزی، میزان انتشار NO_x کاهش پیدا می‌کند. علت این تغییر در میزان انتشار NO_x، دمای محفظه‌ی احتراق و غلظت اکسیژن در مخلوط پیش‌آمیخته ورودی (در ناحیه ی کم‌سوخت (فقیر)، $\phi > 0.7$ ، اگرچه کسر مولی اکسیژن کم می‌شود اما بعلت افزایش دما، NO_x افزایش می‌یابد) و همچنین کاهش زمان اقامت بدلیل افزایش سرعت ورودی است. از آنجاکه دما در معادله تشکیل NO_x حرارتی بصورت نمایی ظاهر می‌شود، مهم‌ترین عامل در انتشار NO_x است. در ناحیه ی کم سوخت با افزایش نسبت هم‌ارزی، غلظت اکسیژن و نیتروژن در مخلوط ورودی کاهش می‌یابد اما احتراق به سمت حالت استوکیومتری هدایت می‌شود که عاملی مؤثر در افزایش حداکثر دمای شعله است. همچنین در ناحیه ی کم‌سوخت بدلیل 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 ۰/۹۵، میزان انتشار آلاینده NO_x به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با حرکت از حالت استوکیومتری به سمت پرسوخت انتشار NO_x کاهش می‌یابد که بعلت کاهش در غلظت اکسیژن و نیتروژن موجود در مخلوط پیش‌آمیخته و همچنین کاهش دمای محفظه‌ی احتراق است.

حضور رقیق‌کننده سبب افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط و در نتیجه کاهش دمای شعله می‌شود. از آنجاکه اصلی‌ترین عامل در تشکیل NO_x حرارتی دما می‌باشد لذا با کاهش دمای کوره میزان انتشار آلاینده NO_x نیز کاهش می‌یابد. از طرفی، این نوع چرخش موجب اختلاط بیشتر سوخت،

آزمایشگاهی موجود نمی‌باشند.

در جدول ۲ نیز مقادیر حداکثر کاهش آلاینده NO_x در نسبت های هم ارزی مختلف مشاهده می شود. البته در برخی نسبت های هم ارزی همانگونه که قبلاً اشاره شد شعله دچار خاموشی می شود لذا مقادیر ذکر شده تا رسیدن به مرز خاموشی می باشد.

جدول ۲: درصد کاهش NO_x در نسبت های مختلف هم ارزی

نسبت هم ارزی	درصد کاهش آلاینده NO_x (%)
۰/۷	۴۱*
۰/۸	۴۹*
۰/۹	۶۰
۱/۰	۵۵
۱/۱	۶۶
۱/۲	۵۳*
۱/۳	۵۸*

* خاموشی شعله

شکل ۷ نحوه ی نمونه گیری از گازهای خروجی داخل دودکش و همچنین دستگاه آنالیز گاز را نشان می دهد. با قرار دادن حس گر مربوطه در داخل دودکش و گذشت مدت زمانی تا رسیدن به حالت پایدار دستگاه شروع به ثبت داده های آزمایشگاهی می کند. برای نمونه گیری از دو حس گر استفاده می شود که پیش از انجام آزمایش ها کالیبره شده اند. در صورت مشاهده اختلاف فاحش بین داده های ثبت شده، نمونه گیری مجدد با حس گر دیگر نیز صورت می گیرد تا حتی الامکان از بروز خطا جلوگیری شود. اندازه گیری NO_x در سه نقطه (نقطه انتهایی محفظه احتراق یا ابتدای خروجی دودکش و در دو نقطه مختلف از دودکش) صورت گرفته که مقادیر NO_x ثبت شده برابر می باشد.



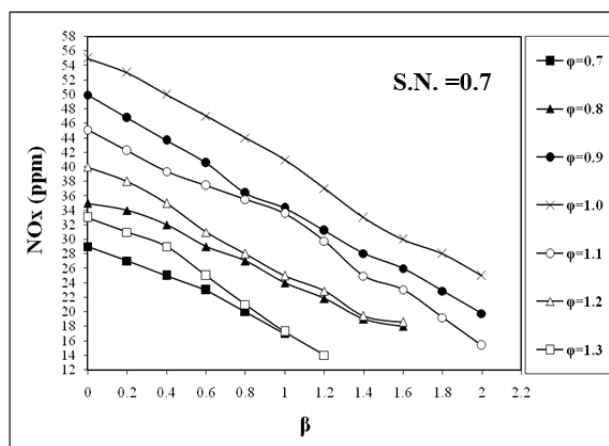
شکل ۷: نمونه گیری از گازهای خروجی دودکش و دستگاه آنالیز گاز

شکل ۸ نیز بردارهای جریان حاصل از شبیه سازی محفظه ی احتراق به وسیله ی نرم افزار فلوئنت را در عدد چرخش ۰/۷ بصورت شماتیک نشان داده شده است.

جدول ۱: حدود خاموشی در نسبت های مختلف هم ارزی

نسبت هم ارزی	حد خاموشی در محدوده ی $(0.0 < \beta < 2.0)$
۰/۷	۱/۱
۰/۸	۱/۸
۰/۹	-
۱/۰	-
۱/۱	-
۱/۲	۱/۸
۱/۳	۱/۴

شکل ۶ نیز نتایج آزمایشگاهی میزان غلظت NO_x برحسب نسبت رقیق سازی در محدوده نسبت های هم ارزی (۱/۳-۰/۷)، شامل نواحی کم سوخت، استوکیومتریک و پُرسوخت را نشان می دهد.

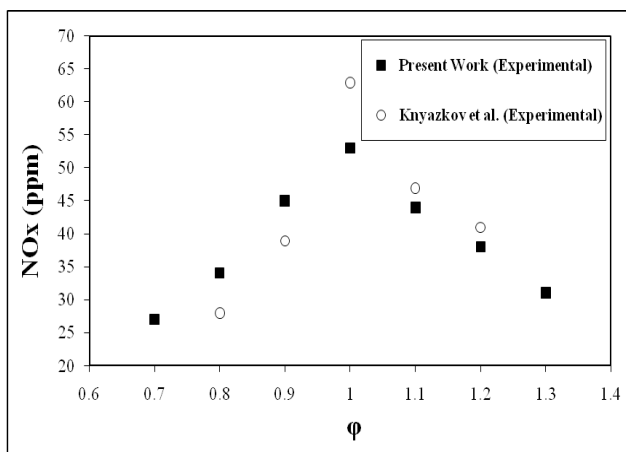


شکل ۶: تأثیر رقیق کننده N_2 بر انتشار آلاینده NO_x در نسبت های مختلف هم ارزی و رقیق سازی و عدد چرخش ۰/۷

همانطور که از شکل ۶ مشاهده می شود، انتشار آلاینده NO_x با افزایش نسبت رقیق سازی کاهش یافته است. رقیق سازی با N_2 باعث افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط و همچنین انرژی فعال سازی بالای مولکول نیتروژن بدلیل داشتن پیوند سه گانه، افزایش سرعت مخلوط ورودی (بعلت افزایش دبی ورودی و ثابت ماندن قطر ورودی) و در نتیجه کاهش زمان اقامت از دلایل کاهش دمای شعله و در نهایت کاهش انتشار آلاینده NO_x می باشند. از طرفی چرخش با ایجاد ناحیه ی برگشتی در نزدیک شعله، باعث اختلاط بهتر سوخت و هوا شده که سبب می شود مقداری از محصولات احتراق که در ابتدای شعله تشکیل شده بازگشت داده شده و مجدداً وارد واکنش با هیدروکربن ها شوند. بدلیل اینکه برخی از گونه های موجود در گازهای برگشتی دارای ظرفیت حرارتی بالایی هستند حرارت ناشی از احتراق را جذب کرده که این دو عامل باعث کاهش NO_x می شود. همچنین با رؤیت شعله مشاهده می شود که خاموشی شعله اتفاق می افتد لذا در نسبت های هم ارزی ۰/۷، ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۳ مقادیر

باتوجه به تصویر مشاهده می‌شود که با ایجاد جریان چرخشی، شعله پهن‌تر و طول آن کمتر شده که این شرایط با اندکی اختلاف در داخل محفظه‌ی احتراق نیز وجود دارد و سبب می‌شود حالت گریز از مرکز از پایین‌دست تا بالادست جریان ایجاد شود. علاوه بر این نواحی CTRZ شکل گرفته به شکل بیضی بر روی شعله نشان داده شده است.

در شکل ۱۰، به مقایسه داده‌های بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی نیازکوف و همکارانش [۲۷]، که بر روی تأثیر رقیق‌سازی بر انتشار آلاینده NO_x در شعله پخشی متان - هوای رقیق شده با N₂ در $\beta = 0.2$ صورت گرفته، پرداخته شده است.



شکل ۱۰: مقایسه تأثیر N₂ بر NO_x در محدوده‌ای از نسبت‌های هم‌ارزی و $\beta = 0.2$ با نتایج آزمایشگاهی نیازکوف و همکارانش [۲۷]

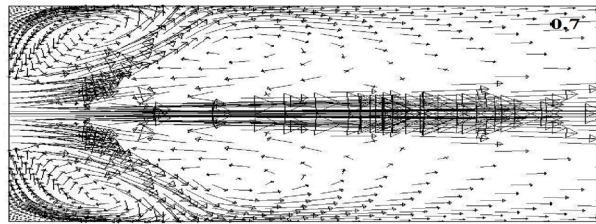
نتایج بدست آمده روند خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نیازکوف و همکارانش نشان می‌دهد.

شایان ذکر است هرچند سوخت‌های متان و پروپان تفاوت اندکی در انتشار آلاینده NO_x دارند [۲۸] اما در بعضی حالات اختلاف مشاهده شده نسبتاً زیاد می‌باشد که دلایل آن عبارتند از: تغییر شرایط آزمایش، سوخت بکار رفته، خطا بعلت استفاده از تجهیزات و وسایل اندازه‌گیری مختلف، تعاریف نسبت رقیق‌سازی، خطای اپراتور و همچنین استفاده از چرخنده‌هایی با هندسه مختلف.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر چرخش و رقیق‌سازی بر تشکیل آلاینده NO_x در شعله پیش‌آمیخته پروپان - هوا بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که:

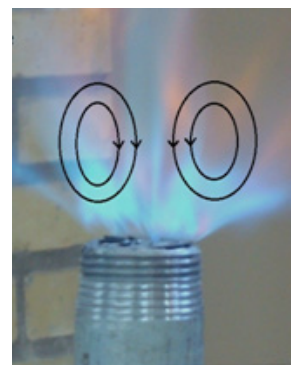
- با رقیق‌سازی سوخت، دمای محفظه‌ی احتراق بدلیل افزایش ظرفیت‌حرارتی مخلوط و کاهش غلظت اکسیژن، کاهش می‌یابد.
- با ایجاد چرخش، دما در تمامی نواحی کاهش پیدا می‌کند و به کمترین مقدار در انتهای کوره می‌رسد.
- با ایجاد جریان چرخشی شعله پهن‌تر شده و طول آن نیز کوتاهتر می‌شود.



شکل ۸: شماتیک بردارهای جریان در عدد چرخش ۰/۷

مشاهده می‌شود در این عدد چرخش، درون جریان دو گردابه به وجود می‌آید، گردابه فوقانی که در اثر جدایش جریان از لبه‌ی تیز بوجود آمده و مشابه گردابه ناشی از بازشدگی ناگهانی در مسیر جریان سیال درون لوله است که آن را ناحیه‌ی گردش مجدد گوشه‌ای جریان (CRZ) می‌نامند. همچنین یک گردابه در مرکز محفظه‌ی احتراق که ناشی از پرتاب شدن ذرات سیال به سمت دیواره و تولید یک ناحیه‌ی کم فشار در نزدیکی محور تقارن می‌باشد و سبب برگشت جریان از میانه کوره به سمت مقطع ورودی شده و به آن ناحیه‌ی گردش مجدد داخلی (IRZ) می‌گویند. جریان رو به جلو و رو به عقبی که در اثر این گردابه بوجود آمده سبب افزایش اختلاط دود و مخلوط تازه‌ی محترق نشده و همچنین افزایش نرخ احتراق می‌شود. این جریان تأثیر زیادی بر شکل‌گیری آلاینده NO_x داشته که بدلیل ایجاد IFGR در نزدیکی شعله می‌باشد. در اعداد چرخش بالا، ($0.5 < S.N.$)، با ایجاد ناحیه‌ی برگشتی CTRZ^۶ در نزدیکی شعله، اختلاط سوخت، هوا و رقیق‌کننده بیشتر می‌شود. این چرخش باعث می‌شود مقداری از محصولات احتراق تشکیل شده در ابتدای شعله بازگشته و مجدداً وارد ناحیه‌ی واکنش با هیدروکربن‌ها شود و از آن جهت که برخی از گونه‌های موجود دارای ظرفیت حرارتی بالایی هستند حرارت ناشی از احتراق را جذب کرده و این دو عامل در مجموع باعث کاهش آلاینده NO_x در شعله چرخشی می‌شود.

شکل ۹ نیز تصویر شعله در هوای آزاد به همراه چرخنده مربوطه را نشان می‌دهد.



شکل ۹: عکس شعله در نسبت هم‌ارزی ۱/۰، عدد چرخش ۰/۷

- 6 Corner Recirculation Zone
- 7 Internal Recirculation Zone
- 8 Center Toroidal Recirculation Zone

- M., and Hustad, J. E., "A Comparison of Low NO_x Burners for Combustion of Methane and Hydrogen Mixtures", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 1123- 1129, 2002.
- [12] Ghoniem, A. F., Annaswamy, A., Park, S., and Sobhani, Z. C., "Stability and Emissions Control Using Air Injection and H₂ Addition in Premixed Combustion", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, No. 2, pp. 1765- 1773, 2005.
- [13] Kim, H. K., and Kim, Y., "NO Reduction in 0.03-0.2 MW Oxy-Fuel Combustor Using Flue Gas Recirculation Technology", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 3377- 3387, 2007.
- [14] Cho, E.S., and Chung, S.H., "Characteristics of NO_x Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides", KSME International Journal, Vol. 18, No. 12, pp. 2303- 2309, 2004.
- [15] Bell, S. R., and Gupta, M., "Extension of the Lean Operating Limit for Natural Gas Fueling of A Spark Ignited Engine Using Hydrogen Blending", Combustion Science and Technology, Vol. 123, pp. 23- 48, 1997.
- [16] Syred, N., and Beer, J. M., "Combustion in Swirling Flows: A Review", Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 143- 201, 1974.
- [17] Gupta, A. K., Lilley, D. G., and Syred, N., Swirl Flows, Abacus Press, Tunbridge Wells, England, 1984.
- [18] Chao, Y. C., Wu, D. C., Hsu, H. W., and Yuan, T., "Effects of Partial Premixing on Pollutant Emissions in Swirling Methane Jet Flames Institute of Aeronautics and Astronautics", National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan 701, ROC, 2001.
- [19] Aldo Coghe, Solero, G., and Scribano, G., "Recirculation Phenomena in A Natural Gas Swirl Combustor", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 28, pp. 709- 714, 2004.
- [20] Dally, B. B., Riesmeier, E., and Peters, N., "Effect of Fuel Mixture on Moderate and Intense Low Oxygen Dilution Combustion", Combustion and Flame, Vol. 137, pp. 418- 431, 2004.
- [21] 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, Vol. 24, pp. 245- 254, 2004.
- [22] Cho, E. S., and Chung, S.H., "Numerical Study on NO Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides", Journal of Mechanical Science and Technology
- در برخی نسبت های رقیق سازی، خاموشی شعله رخ می دهد.
 - ماکزیمم غلظت NO_x در شعله پیش آمیخته چرخشی پروپان - هوا بدون اعمال رقیق سازی، در نسبت هم‌ارزی ۰/۹۵ اتفاق می‌افتد.
 - نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققان مقایسه شده و روند قابل قبولی را نشان می دهد.
- ### ۶- مراجع
- [1] Zink, J., "Ultra Low NO_x Burners for Industrial Process Heater", 2nd International Conference on Combustion Technology for A Clean Environment, Lisbon, 1993.
- [2] Schefer, R. W., Wicksall, D. M. and 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.
- [3] Hill, S. C. and Smoot, L. D., "Modeling of Nitrogen Oxides Formation and Destruction in Combustion System", Progress in Energy Combustion Science, Vol. 26, pp. 417- 458, 2000.
- [4] Zeldovich, Y. B., and Sadovnikov, P. Y., "Oxidation of Nitrogen in Combustion", Science Academy of USSR, 1947.
- [5] Warnats, J., Mass, U., and Dibble, R. W., COMBUSTION, Springer, 2000.
- [6] Lazic, L., Varga, M. A., and Kizek, J., "An Experimental Study of the Influence of FGR on NO_x Formation", ISSN 1580- 2949, Material in Technology, Vol. 38, 2004.
- [7] Littlejohn, D., Majeski, A. J., Shaheen, T., and 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.
- [8] Weiping, Y., and Zhang, J., "Simulation of Methane Turbulent Swirling Flame in the TECFLAM Combustor", Applied Mathematical Modeling, Vol. 33, pp. 2818- 2830, 2009.
- [9] Qing, S., and Zhang, J., "Simulation of Gas-Particle Turbulent Combustion in A Pulverized Coal-Fired Swirl Combustor", Fuel, Vol. 88, pp. 31- 39, 2009.
- [10] Ren, J. Y., Qin, W., Egolfopoulos, F. N., and Tsotsis, T. T., "Strain-Rate Effects on Hydrogen-Enhanced Lean Premixed Combustion", Combustion and Flame, Vol. 124, pp. 717- 720, 2001.
- [11] Rortveit, G. J., Zepter, K., Skreiberg, O., Fossum,

- pp. 231- 257, 2004.
- [26] Fackler K. B., Karalus M. F., Novosselov I. V., Kramlich J. C., and Malte P. C., "Experimental and numerical study of NO_x formation from the lean premixed combustion of CH₄ mixed with CO₂ and N₂", Journal of Engineering for Gas Turbines and power, Vol. 133, 2011.
- [27] 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, Vol. 32, pp. 327- 334, 2009.
- [28] Littlejohn, D., and Cheng, R.K., "Fuel Effects on A Low Swirl Injection for Lean Premixed Gas Turbines", Proceedings on the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 3155- 3162, 2007.
- (KSME International Journal), Vol. 19, No. 6, pp. 1358- 1365, 2005.
- [23] Kumar, P., and Mishra, D.P., "Characterization of Bluff-Body Stabilized LPG Jet Diffusion Flame with N₂ Dilution", Energy Conversion and Management, Vol. 49, pp. 2698- 2703, 2008.
- [24] Park, J., Bae, D. S., Cha, M. S., Yun, J. H., Keel, S. I., Cho, H. C., Kim, T. K., and 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, Vol. 33, pp. 7256- 7264, 2008.
- [25] Kwark, J. H., Jeong, Y. K., Jeon C. H., and Chang, Y. J., "Effect of Swirl Intensity on the Flow and Combustion of a Turbulent Non-Premixed Flat Flame", Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 73,