

## بررسی آزمایشگاهی آلاینده‌های $CO$ و $NO_x$ در محفظه احتراق ضربانی غیر پیش آمیخته

حمید ممهدی هروی\* و امیر مقصودی\*\*

دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، دانشکده فنی مهندسی، گروه مکانیک  
(دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۳/۱۳، پذیرش: ۹۱/۳/۲۸)

محفظه احتراق ضربانی دارای ساختاری ساده، هزینه کارکرد کم و قابل راه‌اندازی با انواع سوخت است. در این تحقیق، با ساخت محفظه احتراق ضربانی، به بررسی تجربی برخی از عوامل مؤثر بر آلاینده‌های  $CO$  و  $NO_x$  و همچنین دمای شعله و فرکانس احتراق پرداخته شده است. دستگاه آزمایش به صورت غیر پیش‌آمیخته ساخته شده است. متغیرهای کلیدی آزمایش دبی جریان سوخت ورودی و طول لوله تخلیه هستند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با کاهش دبی سوخت، غلظت  $CO$  و  $NO_x$  کاهش یافته و به کمترین مقدار خود به ترتیب  $17 \text{ ppm}$  و  $65 \text{ ppm}$  می‌رسند. این مقدار  $NO_x$  در مقایسه با مشعل‌های معمولی که در حدود  $58$  تا  $138 \text{ ppm}$  می‌باشد، بسیار مطلوب است. افزایش طول لوله تخلیه باعث کاهش غلظت آلاینده‌های  $CO$  و  $NO_x$  و همچنین سبب کاهش فرکانس احتراق می‌شود. مقایسه نتایج حاصل با نتایج سایر محققان مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: محفظه احتراق ضربانی، غیر پیش‌آمیخته، مواد آلاینده، آزمایشگاهی

### مقدمه

احتراق ضربانی فرایندی است که تحت شرایط نوسانی اتفاق می‌افتد و متغیرهای آن مثل فشار، دما، سرعت و گونه‌های شیمیایی به صورت متناوب با زمان تغییر می‌کنند [۱]. محفظه‌های احتراق ضربانی مزایای زیادی نسبت به سیستم‌های متداول دارند. ضربان باعث اختلاط مؤثر بین گونه‌ها شده که در نتیجه میزان هوای مورد نیاز برای احتراق کامل را کاهش می‌دهد. همچنین، با کاهش اتلاف حرارت از آگروز سیستم، موجب افزایش بازده حرارتی می‌شود. نوسانات جریان در داخل محفظه احتراق نرخ انتقال حرارت از محصولات احتراق به دیواره محفظه احتراق و لوله تخلیه را افزایش می‌دهد [۲]. اختلاط خوب منجر به احتراق کامل شده و انتشار دوده و منو اکسید کربن را کاهش می‌دهد [۳]. همچنین، به علت نرخ زیاد انتقال گرما، زمان‌های اقامت در دمای زیاد کاهش یافته که در نتیجه آن تولید  $NO_x$  حرارتی کاهش می‌یابد.

غلظت انتشار  $NO_x$  از محفظه احتراق ضربانی به طور کلی کمتر از سیستم‌های متداول است. کورلیس [۴] غلظت  $NO_x$  را در حدود  $34$  تا  $46 \text{ ppm}$  در مقایسه با  $58$  تا  $138 \text{ ppm}$  در دیگ‌های بخار متداول گزارش کرده است. انتشار  $NO_x$  به وسیله سه سازوکار حرارتی، فوری و سوخت صورت می‌گیرد. اگر سوخت حاوی نیتروژن نباشد، تولید  $NO$  معمولاً به صورت حرارتی و سریع است که توسط سازوکار زلدویچ تولید می‌شود [۵]. نیتروژن موجود در هوا در دماهای بیشتر از  $1400^\circ\text{C}$  اکسید شده تا اکسیدهای نیتروژن، عمدتاً  $NO$  و مقدار خیلی کم  $NO_2$ ، تولید شود. از آنجا که اکثر فرایندهای احتراق در دمای بیشتر از  $1400^\circ\text{C}$  انجام می‌شوند، سازوکار  $NO_x$  حرارتی مهم‌ترین علت تولید  $NO_x$  است.

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

\*\* کارشناسی ارشد (ایمیل: Msc.Maghsoudi@gmail.com)

داده‌های آزمایشگاهی برای انتشار مواد آلاینده از محفظه‌های احتراق ضربانی بسیار محدودند. همچنین، گزارش‌های متناقض در مورد اثر پارامترهای هندسی و ظرفیت در غلظت مواد آلاینده مشاهده می‌شوند. بنابراین، نمی‌توان یک روند مشابه را در محفظه‌های احتراق ضربانی با شیر آیرودینامیکی و یا شیر مکانیکی مشاهده کرد. در حال حاضر، نتایج گزارش شده توسط مراجع [۶] و [۷]، در یک محفظه احتراق ضربانی هلمهلتز با شیر مکانیکی، می‌توانند به عنوان مرجع در نظر گرفته شوند. کلر و هونگو [۶] نرخ تولید  $NO_x$  را در نسبت هم‌ارزی نزدیک به استوکیومتریکی در یک سیکل با داشتن فشار و دما به‌دست آوردند (در این نسبت هم‌ارزی، سازوکار حرارتی  $NO_x$  غالب بر سازوکار فوری  $NO_x$  است). نتایج آنان حاکی از کاهش مقدار  $NO_x$  در مقایسه با احتراق غیرضربانی بود. دمای میانگین کمتر و کاهش زمان اقامت در دمای بیشتر مهم‌ترین عوامل کاهش  $NO_x$  شناخته شدند. بازگرداندن محصولات احتراق به داخل محفظه احتراق و اختلاط سریع سوخت و هوای تازه ورودی با محصولات احتراق از دیگر عوامل اند و باعث کاهش زمان اقامت در دمای زیاد و افزایش انتقال حرارت در دیواره محفظه احتراق می‌شود.

کلر و همکارانش [۷] تاثیر نسبت هم‌ارزی بر روی انتشار  $CO$  و  $NO_x$  را بررسی کردند و نشان دادند که نتایج آن‌ها مستقل از دبی جرمی سوخت (قدرت) است. غلظت  $NO_x$  از چند ppm در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ به طور یکنواخت تا ۳۵ ppm در نسبت هم‌ارزی تقریباً یک افزایش می‌یابد. منحنی تغییر غلظت منو اکسید کربن با نسبت هم‌ارزی به صورت U شکل است که در نسبت هم‌ارزی حدود ۰/۷۵ غلظت  $CO$  کمتر از ۵ ppm است و در نسبت هم‌ارزی یک، افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. بیل [۸] میزان  $NO_x$  و  $CO$  از خروجی یک محفظه احتراق ضربانی با شیر آیرودینامیکی که با گاز پروپان کار می‌کرد را اندازه‌گیری کرد. قدرت سوخت ورودی در طی آزمایش‌ها ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۱۰ kw بود. اندازه‌گیری‌های  $NO_x$ ،  $CO$  و  $O_2$  در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه انجام گرفت. آزمایش‌ها تا زمانی که نوسانات غلظت به حالت دایمی رسید، ادامه پیدا کرد. غلظت  $NO_x$  برای قدرت سوخت ورودی به ترتیب ۲۸، ۳۵ و ۳۷ ppm اندازه‌گیری شد و نشان داد که افزایش دبی سوخت ورودی باعث افزایش  $NO_x$  می‌شود. این موضوع متناقض با مراجع [۴] و [۷] است که نشان داده بودند غلظت  $NO_x$  مستقل از دبی جرمی سوخت است. به نظر می‌رسد تاثیر دبی سوخت بر غلظت  $NO_x$  ناشی از غیر پیش‌آمیخته بودن سوخت و هوا در محفظه احتراق ضربانی مجهز به شیر آیرودینامیکی است. همچنین، غلظت  $CO$  برای نرخ سوخت‌های ورودی به ترتیب ۷۰۰، ۱۲۵۰ و ۲۰۰۰ ppm است که نشان می‌دهد با افزایش نرخ سوخت ورودی، غلظت  $CO$  افزایش می‌یابد. هانبی و یونگ [۹] میزان اکسید نیتروژن  $NO$  در یک محفظه احتراق ضربانی از نوع اشمیت با سوخت متان و به صورت غیر پیش‌آمیخته را اندازه‌گیری کردند. در این محفظه دامنه فشار و فرکانس احتراق می‌توانست مستقل از هم تغییر کند.

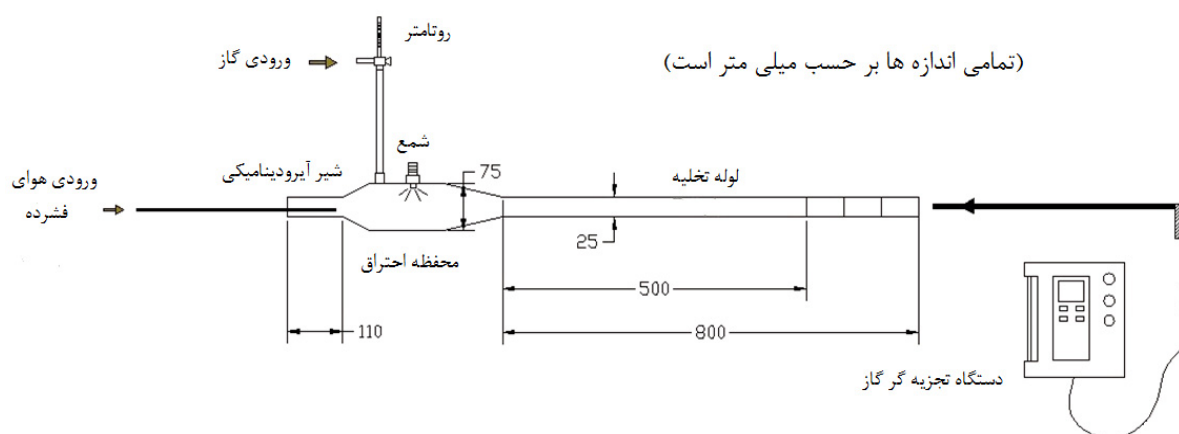
هروی [۱۰] یک محفظه احتراق ضربانی از نوع هلمهلتز مجهز به شیر آیرودینامیکی را مدلسازی کرد. سپس، با اتصال مدل ترمو-سیالاتی به نرم‌افزار کمکین (Chemkin) [۱۱]، نشان داد که علاوه بر فشار، دما و گونه‌های شیمیایی مواد آلاینده نیز رفتار نوسانی دارند. همچنین، نشان داد که با افزایش طول لوله تخلیه،  $NO_x$  و  $CO$  افزایش می‌یابند. بارهام و همکارانش [۱۲] به مقایسه انتشار آلاینده‌های اصلی  $NO_x$  و  $CO$  در دو محفظه احتراق ضربانی گازسوز ۵ و ۱۵kw پرداختند. آن‌ها نشان دادند که مقادیر  $NO_x$  بیشتر تحت تاثیر نسبت هوا به سوخت است تا ظرفیت محفظه احتراق. نتایج آن‌ها روند مشابهی با نتایج [۶] و [۷] را نشان می‌داد.

در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی میزان آلاینده‌های  $CO$  و  $NO_x$  در محفظه احتراق ضربانی غیر پیش‌آمیخته هلمهلتز و مقایسه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها با نتایج سایر محققان پرداخته شده است. داده‌های آزمایشگاهی در زمینه انتشار آلاینده‌ها در مقایسه با داده‌های عددی بسیار کمتر است؛ لذا در مرحله نخست، با بررسی مدل‌های ساخته‌شده توسط دیگر محققان، یک محفظه احتراق ضربانی از نوع هلمهلتز ساخته شد. پس از تامین شرایط مورد نیاز، احتراق ضربانی در این محفظه تشکیل شد. در مرحله بعد، آلاینده‌های  $CO$  و  $NO_x$  با استفاده از امکانات و تجهیزات موجود اندازه‌گیری شد. انتشار کم

آلاینده‌ها در محفظه‌های احتراق ضربانی عاملی است که ضرورت تحقیق در مورد این محفظه‌ها و کاربرد آن‌ها در صنعت را خاطر نشان می‌سازد.

## فرایند آزمایش

محفظة احتراق ضربانی طراحی شده از نوع هلمهلتز و مجهز به شیر آیرودینامیکی است که غیر پیش‌آمیخته است. ورودی سوخت و هوا در این محفظه به صورت مجزاست. شکل ۱ طرحواره دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۱ طرحواره محفظه احتراق مورد آزمایش

محفظة احتراق طراحی شده تلفیقی از محفظه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های کلر [۷] و بیل [۸] است. با هدف کاهش مصرف سوخت و تثبیت دبی سوخت ورودی در مراحل آزمایش، ابعاد محفظه متناسب با طرح کلر [۷]، که نسبت به سایر محفظه‌های ساخته شده کوچک‌تر بود، انتخاب شد و به جهت استفاده از حالت غیر پیش‌آمیخته، از طرح بیل [۸] استفاده شد. محفظه احتراق مذکور مانند سایر محفظه‌های احتراق ضربانی شامل سه قسمت اصلی است: ۱- ورودی هوا یا شیر آیرودینامیکی که یک لوله فولادی به طول ۱۱ cm و قطر داخلی ۲/۵۴ cm است و هوا از طریق آن وارد محفظه احتراق می‌شود. ۲- محفظه احتراق که جنس آن از لوله فولادی با ضخامت زیاد (SCH 40)، قطر داخلی ۷/۵ cm و طول ۹ cm است و با تبدیل‌های مناسب به ورودی و لوله تخلیه متصل شده است. ۳- لوله تخلیه که لوله فولادی به قطر داخلی ۲/۵۴ cm و طول ۵۰ cm است و به صورت اتصال رزوه‌ای سه تکه لوله با اندازه‌های یکسان ۱۰ cm به انتهای لوله تخلیه اضافه شده تا امکان بررسی تاثیر تغییر طول فراهم شود. با توجه به تاثیر افزایش طول لوله تخلیه بر شرایط نوسانی و طی چندین آزمایش، این سه طول متفاوت انتخاب شد.

در این تحقیق، سیستم جرقه موجود شامل یک عدد مولد پرولتاژ در حدود ۱۴۰۰۰ ولت و یک عدد شمع خودرو است. سیستم جرقه مذکور تنها در سیکل اول احتراق استفاده می‌شود و پس از پایان سیکل اول و راه‌اندازی احتراق، از مدار خارج و خاموش می‌شود. در ابتدای راه‌اندازی، به منظور تامین هوای مناسب برای احتراق ضربانی، هوا به وسیله کمپرسور به داخل محفظه احتراق تزریق می‌شود و پس از حصول حالت ضربانی، تزریق هوا متوقف می‌شود. سوخت مورد استفاده، گاز پروپان است که از طریق کپسول‌های متداول صنعتی تامین می‌شود. به علت عدم امکان تهیه مبدل فشار فرکانس بالا (High frequency pressure transducer) و اطمینان از حصول تشکیل احتراق ضربانی، یک عدد فشارسنج بر روی محفظه نصب شد. نوسانات فشار مشاهده شده موید تشکیل احتراق ضربانی است.

## سیستم اندازه‌گیری

به منظور اندازه‌گیری میزان آلاینده‌های موجود از یک عدد دستگاه آنالیزور گاز مدل Testo 350 xL استفاده شده است. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری گونه‌های موجود در محصولات احتراق و گازهای خروجی لوله تخلیه مانند  $\text{NO}_2$ ،  $\text{NO}$ ،  $\text{CO}$ ، دما و درصد هوای اضافی و بازده احتراق را دارد. این دستگاه دارای واحد آماده‌سازی گاز جهت چگالش گاز خروجی و جذب  $\text{H}_2\text{O}$  است. دقت اندازه‌گیری غلظت  $\text{CO}$ ،  $\text{NO}_x$  و اکسیژن ۱ ppm است. میله نمونه‌گیر (Probe) دستگاه مذکور در خروجی لوله تخلیه با فاصله مجاز نصب شده و تمامی اندازه‌گیری آلاینده‌ها بدین شکل انجام شده است. حداقل فاصله زمانی اندازه‌گیری این دستگاه ۱ ثانیه است. اندازه‌گیری‌های صوتی توسط یک مدار الکترونیکی آمپلی‌فایر، که قابلیت ضبط نوسانات صوتی با قدرت‌های مختلف را دارد، صورت گرفته است. این مدار الکترونیکی مشابه یک میکروفن عمل می‌کند و نوسانات صوتی را به نوسانات ولتاژ تبدیل می‌کند. خروجی ولتاژ این مدار الکترونیکی به یک دستگاه اسیلوسکوپ متصل شده است. دستگاه اسیلوسکوپ قابلیت نمایش نوسانات ولتاژ در دوره‌های تناوب گوناگون را داراست. از این رو دوره تناوب هر نوسان به راحتی قابل ملاحظه است. بعد از تحلیل‌های مورد نیاز و میانگین‌گیری‌های مربوطه، فرکانس هر مرحله از آزمایش به دست آمده است. میزان دبی گاز ورودی نیز به وسیله یک دستگاه روتامتر (SWPF-06A) با دقت ۱ لیتر بر دقیقه و دامنه کاری ۰ تا ۵۰ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری شده است. عملکرد روتامتر به صورت شیر یک‌طرفه علاوه بر اندازه‌گیری سوخت ورودی موجب افزایش ایمنی می‌شود. دمای گازهای خروجی توسط یک دستگاه ترموکوپل (نوع K) با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری می‌شود. این ترموکوپل در خروجی لوله تخلیه با فاصله مشخص نصب شده است و تغییرات دما توسط میله نمونه‌گیر مربوطه ثبت می‌شود. به منظور مشاهده تغییرات فشار در محفظه احتراق، از یک عدد فشارسنج با دقت ۰/۰۵ بار استفاده شده است. به وسیله این فشارسنج نوسان فشار در محفظه احتراق به راحتی قابل مشاهده است.

## میزان خطا در داده‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، ابتدا برای هر داده آزمایش سه بار تکرار 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 [۱۳]:

$$\sigma_m = \sigma / n^{0.5} \quad (1)$$

در این فرمول،  $\sigma_m$  انحراف معیار مقدار میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها و  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه است. درصد عدم قطعیت ( $X$ ) داده‌های آزمایشگاهی از رابطه زیر محاسبه شده است که در آن  $\bar{X}$  مقدار میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی است.

$$x = 100 \sigma_m / \bar{x} \quad (2)$$

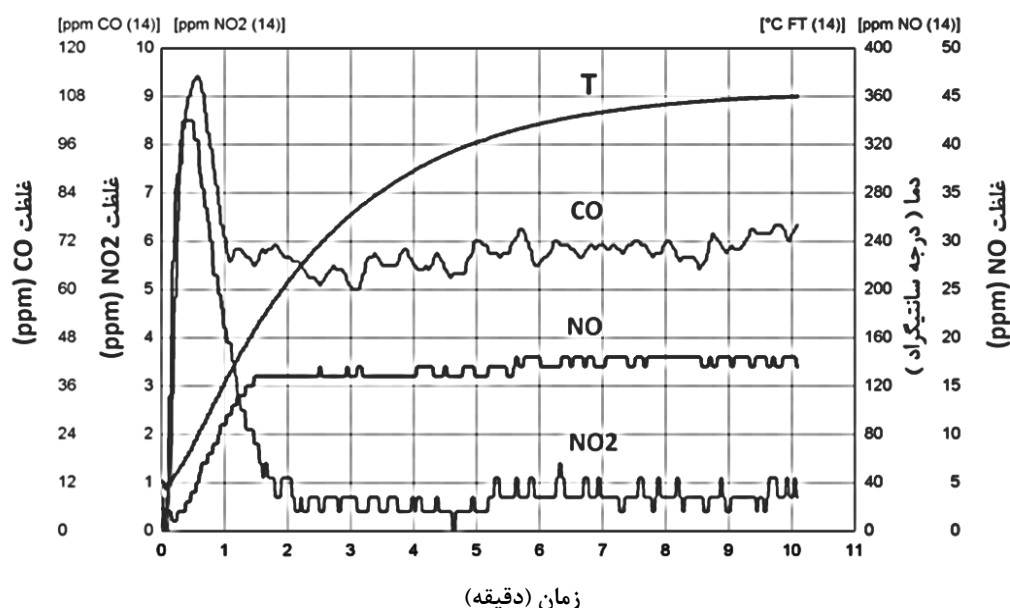
آزمایش‌ها در دبی‌های ثابت انجام گرفتند. خطای انحراف نتایج در هر دبی کمتر از ۵ درصد است. این میزان خطا برای مقادیر غلظت  $\text{NO}_x$  در حدود ۳/۳ درصد و برای مقادیر دما ۲/۶ درصد است.

## محدوده کاری

به منظور تعیین محدوده کاری محفظه احتراق ضربانی، آزمایش‌های متعددی صورت گرفت. با تغییر دبی سوخت، محدوده عملکرد احتراق ضربانی شناسایی شد. دوره نمونه‌گیری برای این اندازه‌گیری در حدود ۱۰ دقیقه انتخاب شد و دبی مناسب پروپان به عنوان سوخت برای تشکیل احتراق ضربانی پایدار در محدوده ۱۲ تا ۳۷ lit/min تعیین شد. احتراق ضربانی در ابتدا و انتهای این محدوده ناپایدار است، به طوری که در دبی کمتر از ۱۲ lit/min شعله خاموش می‌شود و در دبی بیشتر از ۳۷ lit/min شعله دایمی تشکیل می‌شود. بنابراین، اندازه‌گیری‌ها روی محدوده عملکرد ضربانی پایدار بین ۱۵ تا ۳۰ lit/min پایه‌ریزی شد.

## نتایج و بحث

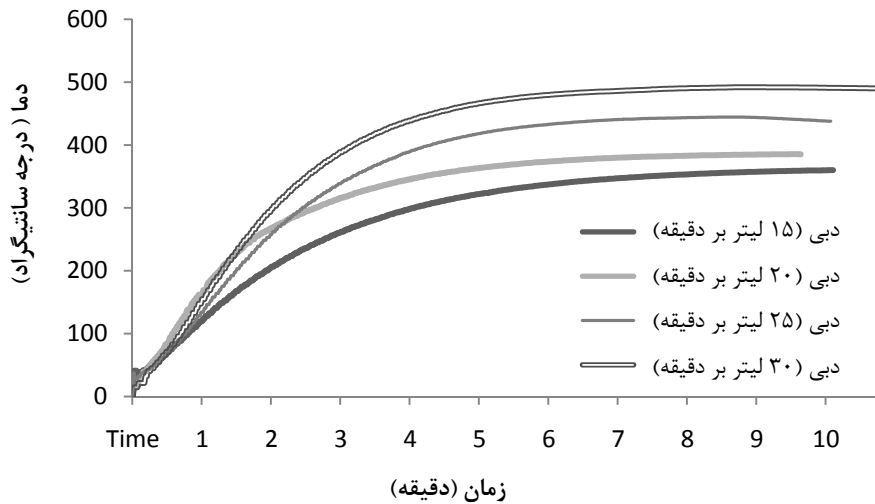
نظر به اینکه حداقل فاصله زمانی ثبت داده‌ها توسط دستگاه آنالیزور گاز ۱ ثانیه است، امکان ثبت نوسان متغیرها مطابق با فرکانس عملکرد دستگاه وجود ندارد. به دلیل ماهیت احتراق ضربانی و تاثیر آن بر روی شرایط احتراق اعم از دما و غلظت آلاینده‌ها، متغیرها دایما در حال نوسان‌اند و دستگاه با فاصله زمانی ۱ ثانیه این نوسانات را ثبت می‌کند. شکل ۲ خروجی مستقیم از نرم‌افزار دستگاه آنالیزور گاز است. دستگاه آنالیزور گاز با اتصال به رایانه و استفاده از نرم‌افزار مربوطه می‌تواند نتایج بسیار دقیق و معتبری را ارائه کند. خروجی نرم‌افزار غیر قابل تغییر است. مشاهده می‌شود که تغییرات غلظت آلاینده‌ها به صورت نوسانی است.



شکل ۲- تغییرات آلاینده‌ها و دما در خروجی لوله تخلیه با دبی سوخت ۱۵ lit/min

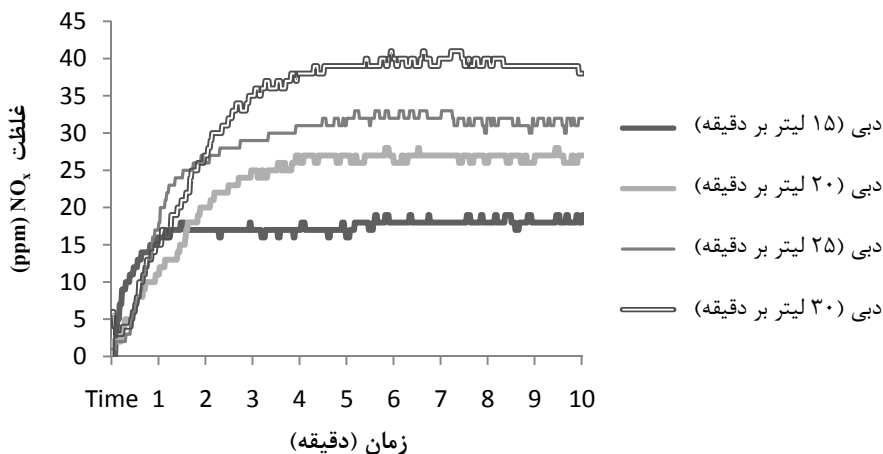
وجود نوسان در مورد مقادیر دما نیز صادق است، اما به دلیل فرکانس زیاد تغییرات و عدم توانایی ثبت نوسانات دما با این فرکانس، شکل‌های ارائه شده برای دما به صورت یکنواخت‌اند. اکثر محققان با این مسئله مواجه بوده‌اند و تنها در موارد محدود مانند دک و همکارانش [۱۴] در دانشگاه میشیگان آمریکا با تابش نور فلورانس اتمی توانستند نوسانات دما را ثبت کنند. شکل ۲ نوسانات دما و کسرهای مولی مواد آلاینده، در خروجی لوله تخلیه، در شروع و پس از رسیدن به شرایط ضربانی پایدار را نشان می‌دهد. دبی جرمی سوخت ۱۵ lit/min است. نوسانات مواد آلاینده پس از ۳ دقیقه از شروع اشتعال به صورت پایدار در می‌آیند. در این حالت متوسط غلظت CO و NO<sub>x</sub> به ترتیب ۶۵ و ۱۷ ppm است.

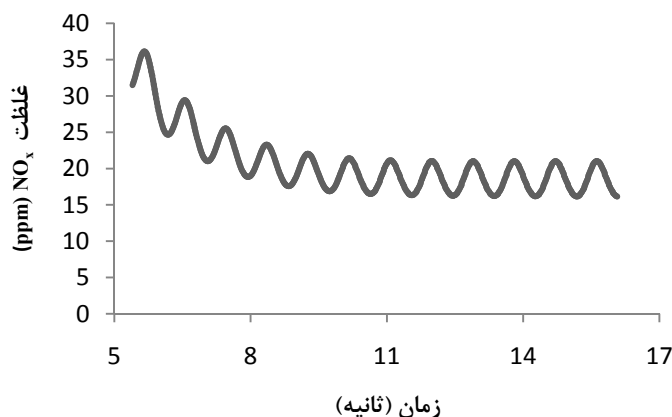
در شکل ۳، تغییرات دما بر حسب زمان، تحت تاثیر تغییر دبی سوخت، نشان داده شده است. شکل ۳ از اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل نوع K نصب شده در خروجی لوله تخلیه به دست آمده است. روند افزایش دما نسبت به زمان سیر صعودی دارد و پس از گذر از مراحل اولیه آزمایش ثابت می‌شود. با افزایش دبی سوخت، انرژی آزاد شده حاصل از احتراق افزایش می‌یابد. این افزایش انرژی موجب افزایش دمای احتراق و در نتیجه دمای گازهای خروجی می‌شود. شکل ۳ این موضوع را تصدیق می‌کند که حداکثر دمای گازهای خروجی در دبی سوخت ۳۰ lit/min در حدود ۵۰۰ °C است.



شکل ۳- تغییرات دما در دبی‌های مختلف سوخت بر حسب زمان آزمایش

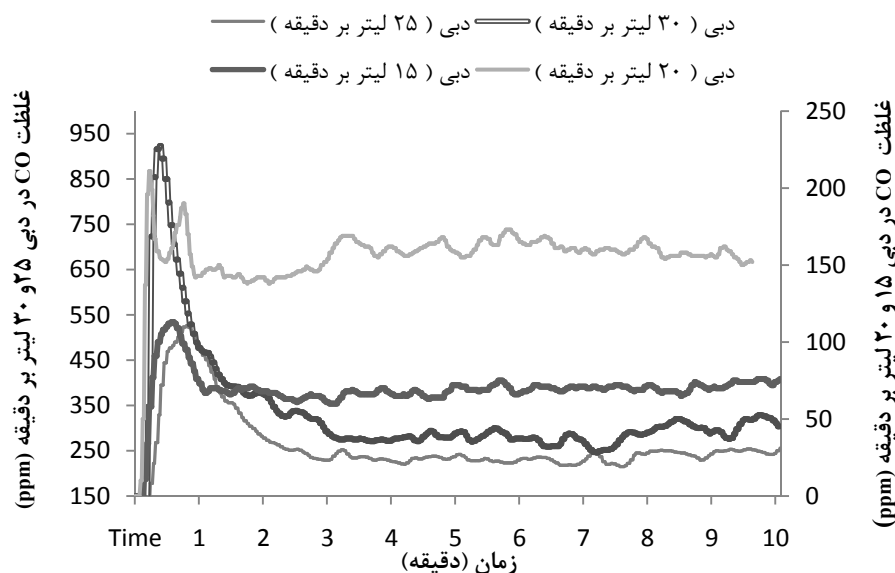
تغییرات غلظت  $\text{NO}_x$ ،  $\text{CO}$  و  $\text{O}_2$  بر حسب زمان توسط دستگاه آنالیزور گاز، که میله نمونه‌گیر آن در خروجی لوله تخلیه نصب شده است، اندازه‌گیری شده‌اند. شکل ۴ تغییرات غلظت  $\text{NO}_x$  بر حسب زمان را در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. غلظت  $\text{NO}_x$  در ابتدا به طور چشمگیری افزایش و سپس نسبت به یک مقدار معین، به صورت نوسانی، تغییر می‌کند. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی جریان سوخت ورودی به محفظه احتراق دمای حاصل از احتراق افزایش می‌یابد. در نتیجه افزایش دما تولید  $\text{NO}_x$  افزایش می‌یابد. به دلیل ماهیت فرایند احتراق ضربانی که منجر به کوتاه‌شدن زمان اقامت محصولات در دمای زیاد می‌شود، انتشار کلی  $\text{NO}_x$  کم است. در کمترین دبی سوخت ۱۵ lit/min، غلظت  $\text{NO}_x$  ۱۷ ppm و در دبی سوخت ۳۰ lit/min، غلظت  $\text{NO}_x$  در حدود ۴۰ ppm است که با نتایج شبیه‌سازی هروی [۱۵]، مطابق شکل ۵، هماهنگی خوبی دارد. شکل ۵ تغییرات غلظت  $\text{NO}_x$  با دبی سوخت ورودی ۱۸ lit/min را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که بازه زمانی و شرایط آزمایش در دو نمونه ذکر شده متفاوت است و هدف نمایش نوسان کمیت‌هاست. مسلماً میزان تغییرات اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در نمونه آزمایشگاهی با حل عددی یکسان نیست.

شکل ۴- تغییرات  $\text{NO}_x$  در دبی‌های متفاوت سوخت #



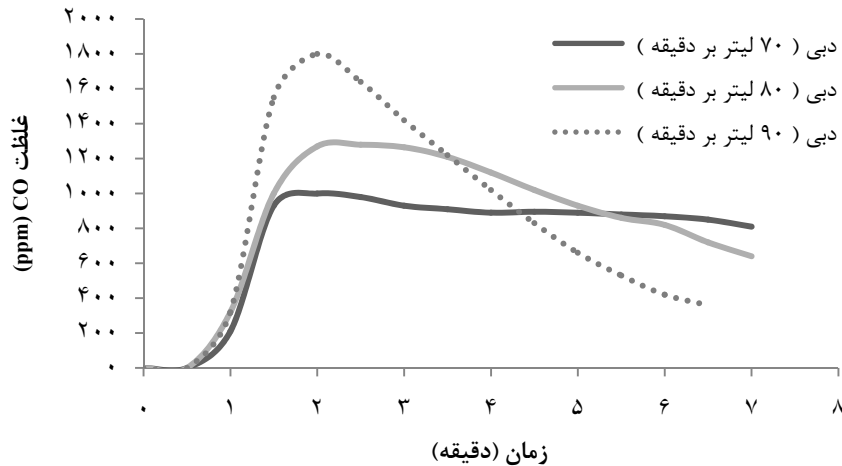
شکل ۵ تغییرات غلظت  $NO_x$  نسبت به زمان با دبی سوخت ۱۸ لیتر بر دقیقه در تحقیق هروی [۱۴]

شکل ۶ غلظت CO در خروجی لوله تخلیه و در دبی‌های مختلف را نشان می‌دهد. با مقایسه غلظت CO در دبی‌های مختلف مشاهده می‌شود که در دبی‌های بیشتر افت غلظت CO، پس از افزایش ناگهانی اولیه، شدیدتر است. همچنین، با افزایش دبی سوخت، غلظت CO افزایش می‌یابد. عامل اصلی تولید CO احتراق ناقص ناشی از غیر پیش‌آمیخته بودن مخلوط سوخت و هواست. زمان اقامت محصولات در لوله تخلیه باعث کاهش غلظت CO در ادامه آزمایش می‌شود. غلظت CO در دبی سوخت ۱۵ lit/min، ۶۵ ppm و در دبی سوخت ۳۰ lit/min، در حدود ۲۷۰ ppm است که با روند نتایج بیل [۸] مطابقت دارد.



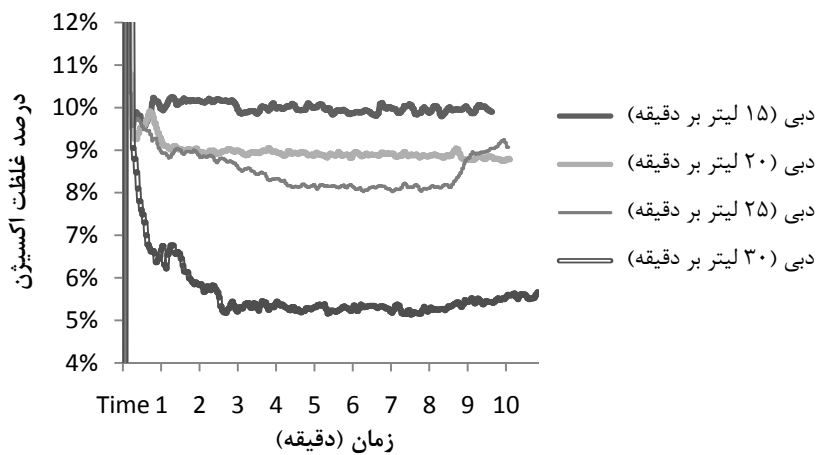
شکل ۶- تغییرات CO در دبی‌های متفاوت سوخت

شکل ۷ تغییرات غلظت CO در دبی‌های متفاوت سوخت در آزمایش بیل [۸] با محفظه‌ای مشابه محفظه احتراق مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در محفظه بیل [۸] نیز با افزایش دبی سوخت ورودی غلظت CO در خروجی لوله تخلیه افزایش می‌یابد.



شکل ۷- تغییرات CO در دبی‌های متفاوت سوخت در تحقیق بیل [۸]

شکل ۸ تغییرات غلظت اکسیژن بر حسب زمان در دبی‌های مختلف سوخت را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه اکسیژن در گازهای خروجی مشاهده می‌شود، احتراق به صورت کم‌سوخت است و مقدار CO تولیدشده در گازهای خروجی ناشی از غیر پیش‌آمیخته بودن سوخت و هوا در این نوع محفظه احتراق است. در کمترین دبی سوخت، ۱۵ lit/min، بیشترین غلظت اکسیژن در گازهای خروجی مشاهده می‌شود که این موضوع با تغییرات غلظت CO کاملاً سازگار است. در دبی سوخت ۳۰ lit/min غلظت اکسیژن در حدود ۵/۳ درصد است که سبب افزایش غلظت CO می‌شود. نتایج حاکی از آن است که در همه موارد احتراق ضربانی در حالت کم‌سوخت رخ داده است و بهترین شرایط احتراق ضربانی در این حالت است.



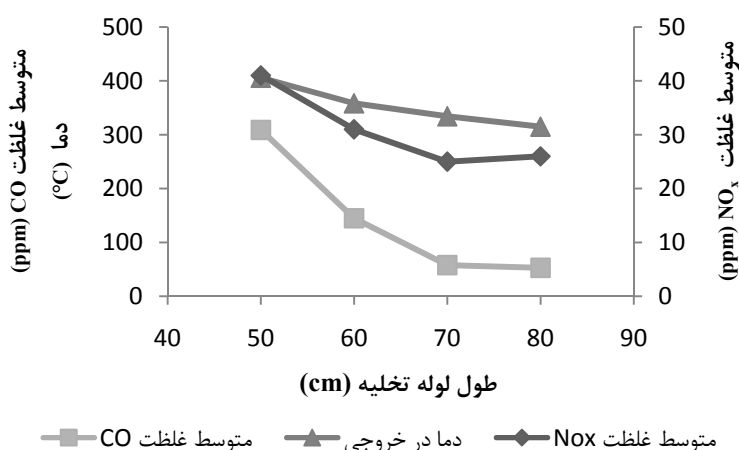
شکل ۸- تغییرات غلظت اکسیژن در دبی‌های متفاوت سوخت

### تأثیر طول لوله تخلیه

تغییرات غلظت آلاینده‌ها و دما در اثر تغییر طول لوله تخلیه اندازه‌گیری شده است. تغییر طول لوله تخلیه باعث تغییر در فرکانس عملکرد محفظه احتراق ضربانی می‌شود. این تغییر در فرکانس، سازوکار اصلی احتراق ضربانی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و این موضوع با نظریه رایلی [۱۶] کاملاً مطابقت دارد.



آزمایش‌ها در چهار طول مختلف لوله تخلیه انجام گرفته است. افزایش طول لوله تخلیه سبب می‌شود که محصولات حاصل از احتراق با فاصله زمانی بیشتری نسبت به حالت اولیه از انتهای لوله تخلیه خارج شوند. این موضوع باعث می‌شود که شرایط احتراق کامل نزدیک‌تر شده و همچنین از طرف دیگر، دمای گازهای خروجی کاهش یابد. شکل ۹ تاثیر تغییر طول لوله تخلیه بر دمای گازهای خروجی و متوسط تغییرات غلظت  $\text{NO}_x$  و  $\text{CO}$  در دبی سوخت ورودی ۳۰ lit/min را نشان می‌دهد.



شکل ۹- تغییرات دما و متوسط غلظت  $\text{NO}_x$  و  $\text{CO}$  نسبت به تغییر طول لوله تخلیه

افزایش طول لوله تخلیه باعث کاهش فرکانس احتراق می‌شود که با نتایج کلر [۷]، بیل [۸] و هانی و یونگ [۹] مطابقت دارد. شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش طول لوله تخلیه و در نتیجه کاهش فرکانس، غلظت انتشار  $\text{NO}_x$  از ۴۰ ppm تا ۲۵ ppm کاهش می‌یابد. نتایج حاکی از آن هستند که روند کاهش  $\text{NO}_x$  تا یک طول بهینه ادامه می‌یابد و پس از آن روند تغییرات معکوس می‌شود، به این صورت که با افزایش طول لوله تخلیه غلظت  $\text{NO}_x$  کمی افزایش می‌یابد. طول بهینه در این آزمایش در حدود ۷۰ cm است. آشکار است که این طول بهینه کاملاً تحت تاثیر حجم محفظه احتراق و توان تولیدی آن است. افزایش طول لوله تخلیه با غلظت  $\text{CO}$  نسبت عکس دارد. با توجه به شکل ۹، هر چه طول لوله تخلیه افزایش می‌یابد غلظت  $\text{CO}$  کاهش می‌یابد، به طوری که در حداکثر طول مورد آزمایش غلظت  $\text{CO}$  از حدود ۳۰۰ ppm به کمتر از ۱۰۰ ppm می‌رسد. به عبارت دیگر، کاهش فرکانس عملکرد محفظه احتراق باعث کاهش تولید  $\text{CO}$  می‌شود. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که زمان اقامت محصولات احتراق در لوله تخلیه بر روی غلظت  $\text{CO}$  تاثیر بسزایی دارد، ولی بر روی غلظت  $\text{NO}_x$  تاثیر زیادی ندارد. این نتایج با روند نتایج شبیه‌سازی هروی [۱۰] کاملاً مطابقت دارد.

در این تحقیق، مشابه تحقیق کیلیکارسلان و همکارش [۱۷]، نوسانات صوتی محفظه احتراق به جای نوسانات فشار اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که در قسمت سیستم اندازه‌گیری ذکر شد، برای اندازه‌گیری نوسانات صوتی یک عدد مدار الکترونیکی، میکروفن در فاصله ۳۰ سانتی‌متری ورودی محفظه احتراق ضربانی نصب شده است. این مدار الکترونیکی نوسانات صوتی را به نوسانات ولتاژ تبدیل کرده و به دستگاه اسیلوسکوپ منتقل می‌کند. با کمک دستگاه اسیلوسکوپ، فرکانس اندازه‌گیری شده است. برای صحت بیشتر، آزمایش اندازه‌گیری فرکانس عملکرد محفظه احتراق چندین بار تکرار شد.

جدول ۱ نتایج حاصل از اندازه‌گیری نوسان‌های صوتی محفظه احتراق مورد آزمایش را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱، افزایش طول سبب کاهش فرکانس می‌شود به طوری که در بلندترین طول، فرکانس احتراق به ۱۴۶ Hz و در کوتاه‌ترین طول به ۱۸۴ Hz رسیده است.

جدول ۱- فرکانس احتراق در طول‌های متفاوت لوله تخلیه

طول لوله تخلیه (cm)	فرکانس احتراق (Hz)	حداقل غلظت NO <sub>x</sub> (ppm)	حداقل غلظت CO (ppm)
۶۰	۱۸۴	۳۱	۲۹۹
۷۰	۱۶۸	۲۶	۱۴۴
۸۰	۱۴۶	۲۵	۵۸

## نتیجه‌گیری کلی

- حالت ضربانی در یک گستره معین از دبی جرمی سوخت به وجود می‌آید؛ در صورتی که دبی جرمی سوخت از حد پایین کمتر باشد، شعله خاموش شده و اگر دبی جرمی سوخت از حد بالا بیشتر باشد، شعله به صورت دائمی تشکیل می‌شود.
- افزایش دبی جریان سوخت منجر به افزایش دمای احتراق و افزایش آلاینده‌های NO<sub>x</sub> و CO می‌شود.
- طول لوله تخلیه بر غلظت آلاینده‌ها تاثیرگذار است به طوری که افزایش طول لوله تخلیه منجر به کاهش آلاینده‌های NO<sub>x</sub> و CO می‌شود.
- با افزایش طول لوله تخلیه، فرکانس احتراق کاهش می‌یابد.
- مقایسه نتایج با آزمایش‌های سایر محققان مطابقت خوبی، به خصوص از لحاظ کیفی، نشان می‌دهد و روند تغییرات، حتی با توجه به تفاوت در شرایط آزمایش، یکسان است.

## منابع

1. A. A. Putnam, *Combustion-Driven Oscillations in Industry*, Elsevier, NY, 1971.
2. B. T. Zinn, "Pulse Combustion: Recent Applications and Research Issues," *Twenty-Fourth Symposium (international) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1992, pp. 1297-1305.
3. B. T. Zinn, *Pulse Combustion*, The World and I magazine, Washington, DC, 1991, pp. 304-311.
4. J. M. Corliss, A. A. Putnam, M. J. Murphy, and D. W. Locklin, "NO<sub>x</sub> Emissions from Several Pulse Combustors," *Presented at the 105th ASME Winter Annual Meeting*, New Orleans, La., Paper No. 84-JPGC-APC-2, 1984.
5. YA. B. Zeldovich, P. YA. Sadovnikov, and D. A. Frankkamenetskii, "Oxidation of Nitrogen in Combustion," *Academy of Sciences of the USSR, Inst. Chem. Phys. Moscow*, 1947.
6. J. O. Keller, and I. Hongo, "Pulse Combustion: The Mechanisms of NO<sub>x</sub> Production," *Combustion and Flam*, 80, 1990, pp. 219-234.
7. J. O. Keller, T. T. Bramlette, P. K. Barr, and J. Alvarez, "NO<sub>x</sub> and CO Emissions from a Pulse Combustor Operating in a Lean Premixed Mode," *Presented at the Western States Section, The Combustion Institute, Combustion and Flame*, 99, 1994, pp. 460-466.
8. A. J. Beale, "Aerovlved Pulse Combustion", PhD Dissertation, Div. of Mechanical Engineering and Energy Studies, Cardiff Univ., Cardiff Wales, UK, 1999.
9. H. W. Au-Yeung, C. P. Garner, and V. I. Hanby, "An Experimental Study of the Effects of Combustion Frequency and Pressure Amplitude on the NO Emissions from Pulse Combustors," *Journal of the Institute of Energy*, 71, No. 489, 1998, pp. 204-208.
10. H. M. Heravi, "Integrated Physical and Chemical Modeling of Pulse Combustors," PhD Dissertation, Div. of Mechanical Engineering and Energy Studies, Cardiff, Wales, UK, 2003.
11. R. J. Kee, F. M. Rupley, and J. A. Miller, *ChemkinII: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics*, Sandia National Laboratories Report No, SAND 89-8009, 1989.
12. P. Barham, K. J. A. Hargreaves, H. Ipakchi and W. C. Maskell, "Comparison and Analysis of NO<sub>x</sub> and CO Emissions from 5 and 15 kw Gas-Fired Pulsed Combustors," *Energy Technology Center, Middlesex University, Bounds Green Road, London N11 2NQ, UK*, 1991.
۱۳. م. ملکی و ب. دبایی‌نیا، *روش‌های اندازه‌گیری در مهندسی*، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۶۹.
14. J. E. Dec, J. O. Keller, and V. S. Arpaci, "Heat Transfer Enhancement in the Oscillating Turbulent Flow of a Pulse Combustor Tailpipe", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35, No. 9, 1992, pp. 447-468.
15. H. M. Heravi, J. R. Dawson, P. J. Bowman, and N. Syred, "Primary Pollutant Prediction from Integrated Thermo-fluid-Kinetic Pulse Combustor Models," *Journal of Propulsion and Power*, 21, No. 6, 2005, pp. 1092-1097.
16. L. Rayleigh, "The Explanation of Certain Acoustical Phenomena" *Nature*, 18, No. 455, July 1878, pp. 319-321.
17. A. Kilicarslan, and A. Arisoy, "Acoustic Analysis of a Liquefied Petroleum Gas-Fired Pulse Combustor," *Applied Acoustics*, 69, 2008, pp. 770-777.

## English Abstract

# The Experimental Investigation of Pollutants of $\text{NO}_x$ and CO in a Non-Premixed Pulse Combustor

H. M. Heravi and A. Maghsoodi

Mechanical Engineering Division, Faculty of Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University

(Received: 2012.1.22, Received in revised form: 2012.6.2, Accepted: 2012.6.17)

*Pulse combustors are simplest form of combustor with low cost and operating with different fuels. In this research a non-premixed pulse combustor is constructed and some factors affecting the  $\text{NO}_x$ , CO, flame temperature and frequency of combustion are experimentally investigated. The key variables of the experiments are the inlet mass flow rate of fuel and the tailpipe length. The results show that with decreasing the mass flow rate of fuel, the concentrations of  $\text{NO}_x$  and CO are reduced and reached to its minimum values of 17 and 65 ppm, respectively. This level of  $\text{NO}_x$  emission from pulse combustors is quoted to be generally lower than from conventional burners which reported to be 58-138 ppm. Increasing the tailpipe length causes the concentrations of  $\text{NO}_x$  and CO to be decreased and the frequency of combustion is also decreased. The results are compared with the results of other researchers and are in good agreement.*

**Keywords:** Pulse combustor, Non premix, Pollutants, Experimental