

## بررسی تجربی احتراق غیر پیش مخلوط با هوای پیش گرم و نرخ گردش بالا

احسان‌الدین عظیمی‌زاده<sup>۱\*</sup>، محمد فرشچی<sup>۲</sup>، فرهاد فتحیه<sup>۳</sup>، علی خصوصی<sup>۴</sup>

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

\* eazimizadeh@gmail.com

### چکیده

احتراق بدون شعله به صورت تجربی مورد بررسی گرفت. در این روش احتراق، با پیش گرم کردن هوای ورودی و گردش محصولات احتراق در محفظه، منطقه واکنش از یک جبهه محدود، به یک ناحیه وسیع‌تر با دمای اوج کمتر، پخش شده و به این ترتیب اکسید نیتروژن بسیار کمتری تولید می‌شود. پارامترهای قابل کنترل، دمای پیش گرم، نسبت تعادل سوخت به اکسیدکننده و دبی هوا و سوخت می‌باشد. با اعمال شرایط مشابه، احتراق بدون شعله با احتراق شعله نفوذی مقایسه شده است. پارامترهای قابل اندازه‌گیری، دما و نیز ترکیب آگزوز خروجی از جمله اکسیدهای نیتروژن بوده است. اندازه گیریهای انجام شده نشان میدهد که آلاینده‌گی NOx احتراق بدون شعله بسیار کمتر و در واقع یک مرتبه کوچکتر از آلاینده‌گی احتراق با شعله نفوذی میباشد. همچنین، در دمای هوای ورودی کمتر نسبت به فعالیت‌های پیشین، احتراق بدون شعله به دست آمد که به نظر می‌رسد دلیل آن، گرم شدن محفظه احتراق و عدم استخراج انرژی از آن و در نتیجه بالا رفتن دمای مخلوط سوخت، هوا و محصولات احتراق باشد. با تصویربرداری از محفظه احتراق با امکان دید به داخل، می‌توان یکنواخت بودن منطقه واکنش پخش شده را مشاهده کرد. از نتایج این پروژه در طراحی محفظه احتراق موتورهای توربین گازی و همچنین مشعل‌های صنعتی، با هدف کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن و داشتن پروفیل دمایی یکنواخت استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: احتراق بدون شعله، کاهش اکسیدهای نیتروژن (NOx)، توربین گازی.

### ۱- مقدمه

پروژه‌های احتراقی پیوسته کاربردهای بسیاری در سیستم‌های پیش‌رانشی، نیروگاهی و گرمایشی دارد. سوخت این پروژه‌ها فسیلی می‌باشد که آلاینده‌های مختلفی تولید می‌کنند. توسعه سیستم‌های احتراقی این نوع پروژه‌ها با انتشار آلاینده‌گی کمتر هدف پژوهشگران و سازندگان موتور است. چون این آلاینده‌ها مخرب محیط زیست هستند و به‌ویژه پدیده گرم شدن کره زمین را تسریع می‌کنند. عمده‌ترین آلاینده‌های احتراقی عبارتند از هیدروکربن‌های نسوخته، دی‌اکسید کربن، منوکسید کربن، دوده، خاکستر یا ذرات معلق، اکسیدهای گوگرد و نیز اکسیدهای نیتروژن یا NOx. در مجموع سه پروژه اصلی تشکیل NOx وجود دارد که عبارتند از NOx فوری (Prompt)، سوختی و حرارتی (Thermal). تولید NOx فوری با جایگزینی هیدروکربن‌ها با دیگر سوخت‌ها و احتراق بسیار فقیر (Lean) یا بسیار غنی (Rich) مرتفع می‌شود. همچنین، وجود باند نیتروژن در ملکول سوخت منجر به تولید NOx سوختی می‌شود که در شرایط غنی سوخت می‌توان از احتمال شکستن این باندها و لذا تولید NOx سوختی جلوگیری کرد. تولید حرارتی NOx که عمده‌ترین دلیل تولید NOx است، وابستگی شدیدی به دما دارد.

۱- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

بنابراین کاهش دما، مهم‌ترین راهبرد کنترل تولید حرارتی NOx است. دومین هدف، حذف نقاط بسیار داغ جریان است. با افزایش نرخ گردش (Recirculation Ratio)، دمای احتراق کاهش، غلظت اکسیژن در منطقه واکنش (Reaction Zone) و زمان قرارگیری کاهش می‌یابد که به این ترتیب تولید حرارتی NOx کاهش می‌یابد [۱].

در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای کاهش NOx شده است که از آن جمله خنک‌کاری شعله، مرحله‌بندی احتراق، گردش گاز اگزوز و استفاده از بخار آب می‌باشد. اکنون، همه سازندگان به دنبال سیستم‌های احتراقی کم NOx یا حتی بسیار کم NOx هستند. امروزه، اثر مخرب محصولات احتراقی سوخت‌های فسیلی بر محیط زیست و آب و هوای زمین بر کسی پوشیده نیست. از سویی، کارایی سیستم‌های احتراقی در دماهای کاری بالا بیشتر است و از سوی دیگر در این شرایط تولید آلاینده‌ها بیشتر می‌شود. هدف طراحان، فائق آمدن بر تعارض صرفه‌جویی در انرژی و کاهش NOx است. لذا، مفاهیم مختلفی برای فائق آمدن بر این معضل معرفی شده است که از آن جمله مفهوم احتراق پیش‌مخلوط فقیر است که طی بیست سال گذشته، به‌ویژه در توربین‌های گازی پذیرفته شده است. دلیل این امر، استانداردهای زیست‌محیطی است که به این ترتیب انتشار اکسیدهای نیتروژن باید کاهش یابد. احتراق پیش‌مخلوط فقیر، از یک سو، مزیت انتشار کم NOx را دارد، ولی از سوی دیگر، نسبت به تغییرات نسبت تعادل (Equivalence Ratio) سوخت به هوای مخلوط ورودی به محفظه احتراق بسیار حساس است. از سوی دیگر، به دلیل پیش‌مخلوط بودن سوخت و هوا، ریسک به‌کارگیری آن در سیستم‌های احتراقی بالاتر است. به همین دلیل، نمی‌توان مواد واکنشگر را پیش‌گرم (Preheat) کرد و به این ترتیب از کارایی سیستم کاسته خواهد شد [۱].

در این مقاله، به دلیل اهمیت و تازگی بحث، در بخش ۲، مرور مختصری بر احتراق بدون شعله می‌شود. در این بخش، فعالیت‌های تجربی گذشته نیز بررسی می‌شود. در بخش ۳، دستگاه آزمایشگاهی فعالیت حاضر معرفی می‌شود. سپس، در بخش ۴، بررسی نتایج به‌دست آمده از تست‌های تجربی ارائه می‌گردد.

## ۲- احتراق بدون شعله

شکل جدیدی از احتراق یعنی احتراق بدون شعله یا اکسیداسیون بدون شعله (FLameless OXidation) راه حل بسیار نویدبخشی بر سر دوراهی صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش تولید NOx است. احتراق بدون شعله نوع خاصی از احتراق است که توسط واکنش اکسیدکننده با دمای پیش‌گرم بسیار بالا با سوخت، اختلاط محصولات احتراق با واکنشگرها و شدت آشفستگی مشخص می‌شود که این امر باعث پخش شدن منطقه واکنش می‌گردد و لذا، شعله به معنای کلاسیک مشاهده نمی‌گردد. به همین دلیل است که این نوع واکنش، اکسیداسیون بدون شعله نامیده می‌شود. توزیع منقطه واکنش باعث حذف نقاط بسیار داغ در جریان می‌شود که در نتیجه از تولید NOx به شدت جلوگیری می‌گردد.

در بسیاری از فرآیندهای جلوگیری از تشکیل حرارتی NOx سعی در کم کردن اوج دما، کم نگه داشتن زمان قرارگیری در اوج دمایی و جلوگیری از غلظت زیاد اکسیژن در این مناطق است. به همین دلیل، NOx حتی در دماهای بالای هوای پیش‌گرم تشکیل نمی‌شود. مشعل‌های صنعتی که پیوسته و با احتراق بدون شعله کار می‌کنند از کیفیت محصولات احتراق بسیار یکنواختی برخوردار خواهد شد.

برای حذف اوج‌های دمایی، هدف، داشتن توزیع همگن دما است. احتراق بدون شعله شامل وسائلی است که با سوخت بسیار فقیر ولی هوای پیش‌گرم‌شده کار می‌کند. منطقه واکنش در حجم بسیار بزرگتری نسبت به احتراق سنتی رخ می‌دهد. وقتی نرخ واکنش کم باشد، از تولید امواج ترموآکوستیکی جلوگیری می‌شود ولی احتمال رخ دادن خاموشی (Blow-Off) جدی می‌شود. مشکل اخیر با بالا نگه داشتن دمای احتراق مرتفع می‌گردد.

از سوی دیگر، بر خلاف سیستم‌های با شعله که به دلیل وجود گازهای نسوخته و یا خطر انفجار نیاز به نظارت شدید دارند، از مزایای احتراق بدون شعله عدم نیاز به این دو نوع نظارت است. مزیت دیگر آن، عدم احتیاجی به سیستم جرقه‌زنی پیوسته است که این امر به دلیل دمای بالای احتراق می‌باشد. جرقه و نظارت دو عامل خرابی سیستم‌های احتراقی اند که در



احتراق بدون شعله نیازی به آنها نیست. همچنین به دلیل توزیع دما در محفظه احتراق، از تمرکز دمایی و تنش‌های حرارتی و خستگی سازه جلوگیری می‌شود و دیواره آن از دمای یکنواختی برخوردار خواهد بود.

مفهوم احتراق بدون شعله، نخستین بار توسط وونینگ و وونینگ [۲] در سال ۱۹۹۷ میلادی مطرح شد. آنها، با کنترل دمای پیش گرم هوای ورودی به محفظه احتراق، دمای محفظه توسط لوله‌های خنک‌کاری، دبی هوا و سوخت و در نتیجه نسبت تعادل سوخت به هوا و نیز شدت صوت جریان ورودی به نوع ویژه‌ای از احتراق دست یافتند و آن را احتراق بدون شعله نامیدند. همچنین، با اندازه‌گیری توزیع دمای محفظه، مشاهده کردند که پروفیل دمایی احتراق با شعله و بدون شعله به جز در نزدیکی نازل‌ها با هم هماهنگ می‌باشند. از سوی دیگر، نتایج اندازه‌گیری شدت صوت مشعل توسط میکروفن نشان داد، فرکانس صدایی محفظه برای احتراق با شعله نسبت به تحریک افزایش یافته و برای احتراق بدون شعله تقریباً بدون تغییر می‌ماند. بدین ترتیب، در شرایط بهینه، احتراق بدون شعله بدون نمود دیداری یا شنیداری خواهد بود.

پس از احتراق بدون شعله، نام‌های دیگری به این فناوری داده شده است که از آن جمله احتراق با هوای دما بالا (High Temperature Air Combustion) توسط کاتسوکي و هاسه‌گاوا [۳] در سال بعد یعنی ۱۹۹۸ و احتراق آرام یا مایلد (MILD: Moderate and Intense Low-oxygen Dilution) توسط ده‌یوانون و همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۰ بوده است.

کاتسوکي و هاسه‌گاوا [۳]، با کنترل دمای پیش گرم هوای ورودی، نسبت هوای اضافی (Excess Air) و مکان انژکتور سوخت مشاهده کردند که شرایط پایداری شعله نفوذی به گونه‌ای است که اگر میزان اکسیژن کم شود، دمای گازهای ورودی به محفظه احتراق باید افزایش یابد. به بیان دیگر هوای رقیق شده تا ۳٪ حجمی اکسیژن هم، اگر تا ۱۲۰۰K پیش گرم شود، می‌تواند مشتعل و محترق شود. همچنین، میزان NOx کم یک‌رقمی در میلیون و پروفیل یکنواخت دمای محفظه را مشاهده و اندازه‌گیری کردند.

پلسینگ و همکارانش [۵] نیز محفظه احتراقی ساختند که توانایی تعویض نوع احتراق، از شعله کلاسیک به بدون شعله را داشت. پیش گرم کردن هوای ورودی در کار آنها توسط آگروز بوده است. به این ترتیب، با تغییر رژیم احتراق، تولید NOx بسیار کمتری مشاهده کردند.

ده‌یوانون و همکارانش [۴] نیز با مشاهده احتراق آرام پیشنهاد کردند که این نوع احتراق، به دلیل توزیع دمای یکنواخت و مناسب، در صنایع فولادسازی به ویژه ذوب‌آهن، آهنگری و عملیات حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.

فلامه [۶] با توسعه فعالیت وونینگ و وونینگ [۲] فرض شرایط فشار اتمسفری و کنترل دمای پیش گرم هوای ورودی، دمای محفظه احتراق توسط لوله‌های خنک‌کاری و نیز دو نوع مشعل، NOx یک‌رقمی در میلیون را مشاهده کرد که البته میزان NOx با افزایش دمای محفظه افزایش یافت. همچنین، وی وجود اوج‌های دمایی برای احتراق با شعله و توزیع یکنواخت دمای محفظه را برای احتراق بدون شعله اندازه‌گیری نمود.

اوزدمیر و پترز [۷] با ادامه فعالیت پلسینگ و همکارانش [۵] پی بردند که با افزایش نسبت تعادل، نسبت به احتراق پیش‌مخلوط، احتراق بدون شعله پایین‌دست‌تر اتفاق می‌افتد.

هاسه‌گاوا و همکارانش [۸] با توسعه فعالیت کاتسوکي و هاسه‌گاوا [۳] تصاویری از رژیم‌های مختلف احتراق از جمله احتراق بدون شعله نشان دادند. آنها این تصاویر را در نمودار نسبت مولی اکسیژن، که معیاری از نرخ گردش است، به دمای احتراق رسم کردند. به این ترتیب، درک بهتری از شکل رژیم جدید احتراق بدون شعله در حالت مقایسه با احتراق‌های سنتی ارائه کردند.

دالی و همکارانش [۹] با توسعه فعالیت اوزدمیر و پترز [۷]، NOx به نسبت کمی برای احتراق بدون شعله اندازه‌گیری کردند. آنها همچنین، با اندازه‌گیری دمای احتراق، اختلاف کمی میان این دما و دمای هوای ورودی گزارش کردند.

لوکرات و همکارانش [۱۰] در فشار بالا، دما و منطقه واکنش یکنواختی مشاهده کردند. آنها کشف کردند که سرعت جت پیش مخلوط هم برای انتشار آلاینده و هم برای محدوده کاری مفید است و نیز در رژیم احتراق بدون شعله انتشار NOx با فشار افزایش چندانی نمی‌یابد.

لی و همکارانش [۱۱] طراحی مشابهی برای اثر افت فشار و دمای پیش‌گرم هوا را بر انتشار، پایداری و رژیم احتراق بررسی کردند. آنها با کنترل دبی سوخت و هوا و در نتیجه نسبت تعادل سوخت به هوا و نیز دمای پیش‌گرم و مشخصات محفظه احتراق، آلاینده‌های هیدروکربن‌های نسوخته، منوکسید کربن و NOx، دما در طول محفظه و دمای اغزوز و فشار آکوستیکی، نشان دادند که اگر این محفظه چسبیده به انژکتورهای سوخت و هوا نباشد منطقه گردش مرکزی از بین می‌رود. اوورمن و همکارانش [۱۲] با تغییر دادن دمای ورودی به محفظه احتراق، افت فشار و هندسه محفظه به بررسی تجربی حدود رژیم احتراق بدون شعله پرداختند. بدین منظور، آنها، دبی سوخت و در نتیجه نسبت تعادل سوخت به اکسیدکننده، دمای ورودی به محفظه احتراق و میزان تحریک آکوستیکی را کنترل و غلظت NOx، دی‌اکسید کربن، اکسیژن و منوکسید کربن، دمای گردش و میزان نویز را اندازه‌گیری کردند. در بررسی آنها، دمای گردش، NOx و دی‌اکسید کربن با افزایش نسبت تعادل، اکسیژن کاهش و منوکسید کربن ابتدا کاهش و سپس افزایش نشان دادند. از یک سو، دمای گردش، منوکسید کربن و NOx با افزایش قطر محفظه کاهش و اکسیژن و دی‌اکسید کربن افزایش و از سوی دیگر، منوکسید کربن و دی‌اکسید کربن با افزایش طول محفظه کاهش و NOx و اکسیژن افزایش یافتند. همچنین، با افزایش دمای ورودی، منوکسید کربن افزایش، NOx کاهش و اکسیژن، دی‌اکسید کربن و دمای گردش تقریباً ثابت ماندند. با تغییر افت فشار نیز، دمای گردش تغییر محسوسی نکرد.

دوویس و همکارانش [۱۳] نیز با کنترل گرما و دمای پیش‌گرم و دبی سوخت و هوا و در نتیجه نسبت تعادل سوخت به هوا، پارامترهای غلظت و دمای اغزوز را اندازه‌گیری کردند. آنها به این ترتیب پی بردند که در رژیم احتراق بدون شعله می‌توان توزیع دمایی یکنواخت‌تر و میزان غلظت آلاینده‌گی کمتر نسبت به احتراق کلاسیک به دست آورد.

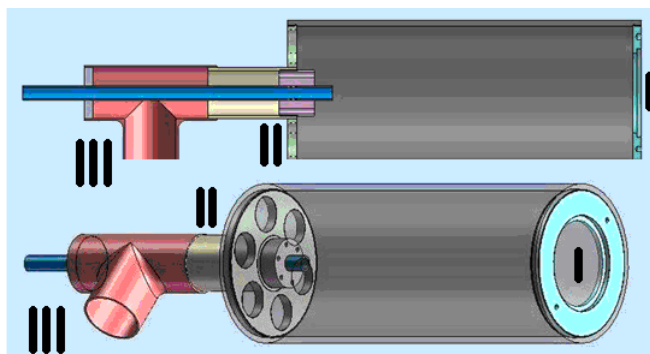
### ۳- دستگاه آزمایشگاهی

با بررسی فعالیت‌های پیشین و جمع‌بندی آنها، به طراحی و ساخت یک محفظه احتراق بدون شعله پرداخته شد. در این اقدام، سعی شد، از یک سو، کلیه پارامترها، از جمله دمای و دبی هوا، دبی سوخت، نسبت تعادل کلی سوخت به اکسیدکننده، طول، قطر، حجم و نسبت طول به قطر محفظه، منطبق بر فعالیت‌های گذشته باشد که در جدول ۱ شرح آن آمده است.

جدول ۱- مقایسه محدوده پارامترهای طراحی محفظه احتراق بدون شعله فعالیت‌های قبلی و حاضر

پارامتر	محدوده فعالیت‌های قبلی	مقدار فعالیت حاضر
دمای هوا (°C)	۱۱۰۰-۳۰۰	۶۰۰-۴۰۰
دبی هوا (g/s)	۳۰.۲-۱.۷	۴.۱-۲.۸
دبی سوخت (g/s)	۱.۲-۰.۱۲	۰.۲۸-۰.۲
نسبت تعادل کلی سوخت به اکسیدکننده	۱.۵-LBO	۱.۳-LBO
طول (mm)	۵۰۰-۲۰۰	۴۰۰
قطر یا عرض (mm)	۳۰۰-۱۰۰	۱۵۲
حجم (lit)	۳۰-۲	۸
طول به قطر (یا عرض)	۵-۲	۲.۶

در مجموع و با در نظر گرفتن محدودیت‌های تامین قطعات، سیستم‌های سوخت و هوا رسانی و سیستم‌های اندازه‌گیری، محفظه احتراق بدون شعله طراحی و ساخته شد. این محفظه، باید به گونه ای طراحی و ساخته شود که به صورت خودکار نرخ گردش بالایی تولید کند. به این ترتیب محصولات احتراق و واکنشگرها با هم ترکیب شده، احتراق، بدون شعله انجام می‌شود. در شکل زیر شمایی از دستگاه مورد استفاده در فعالیت حاضر مشاهده می‌شود.



شکل ۱- طرح شماتیک محفظه احتراق بدون شعله فعالیت حاضر

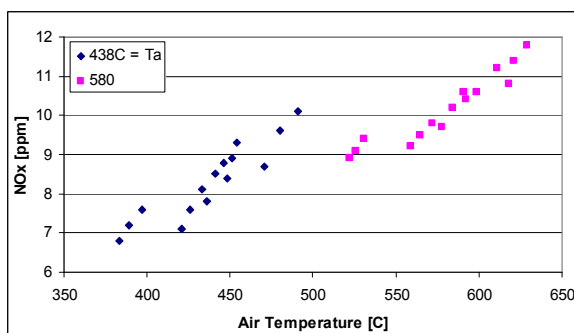
برای پیش گرم کردن هوا از یک گرمکن برقی ۳ کیلووات و برای کنترل دمای هوای خروجی از آن از ترموکوپل تیپ کا (Type K Thermocouple) و ترموستات آت‌بین (ATBIN) مدل 1200K استفاده شد. از مشخصات این ترموستات، قدرت تفکیک  $1^{\circ}\text{C}$  و دقت اندازه‌گیری  $1^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. این دما در محل III نشان‌داده‌شده در شکل ۱ اندازه‌گیری شد. همچنین، دبی سوخت توسط یک روتامتر روسی ساخت شرکت مسکوا (Moskva) مدل PM-A-I (با دقت ۲.۵٪ مقیاس کل) و دبی هوا توسط نازل صوتی (Sonic Nozzle) اندازه‌گیری و کنترل شد. همچنین، دبی روتامتر و نازل صوتی کالیبره و ضابطه نمودار دبی، به ترتیب، بر حسب ارتفاع شناور روتامتر و فشار سکون نازل صوتی، به دست آمد. برای اندازه‌گیری دما و ترکیب گازهای آگزوز محفظه احتراق نیز از یک گاز آنالیزور (Gas Analyzer) ساخت شرکت انگلیسی لند اینسترومنت (Land Instrument) مدل LANCOM III استفاده شد. دقت اندازه‌گیری  $\text{NO}_x$ ، منوکسید کربن، دی‌اکسید کربن و اکسیژن این گاز آنالیزور، به ترتیب، ۲، ۲ و ۱ درصد حجمی می‌باشد. پروب گاز آنالیزور در حالت احتراق بدون شعله در محل II و در حالت احتراق با شعله نفوذی در محل I مشخص شده در شکل ۱ قرار داده شد.

#### ۴- نتایج

همان گونه اشاره شد، دمای پیش‌گرم از مهم‌ترین پارامترهای تشکیل‌دهنده احتراق بدون شعله است. لذا، در ۲ دمای میانگین مختلف  $438^{\circ}\text{C}$  و  $580^{\circ}\text{C}$ ، احتراق انجام می‌شود. همچنین، برای مقایسه کیفیت آلاینده‌گی و دیگر پارامترها، احتراق با شعله نفوذی نیز انجام شد. دمای هوای ورودی در حالت احتراق شعله نفوذی دمای  $35^{\circ}\text{C}$  محیط و نیز  $429^{\circ}\text{C}$  می‌باشد که به یک از دماهای پیش‌گرم احتراق بدون شعله یعنی  $438^{\circ}\text{C}$  نزدیک است و می‌توان نتایج آنها را با هم مقایسه کرد. با بسته شدن کوارتز به انتهای محفظه و باز کردن ۶ آگزوز آن، گردش قوی محصولات احتراق پدید می‌آید و احتراق بدون شعله رخ خواهد داد. با کنترل دبی سوخت و هوای ورودی و در نتیجه نسبت تعادل سوخت به هوا و نیز دمای هوای ورودی، ترکیب و دمای گاز خروجی توسط گاز آنالیزور در دو حالت شعله نفوذی و احتراق بدون شعله اندازه‌گیری شد. به این ترتیب، نتایج زیر به دست آمد.

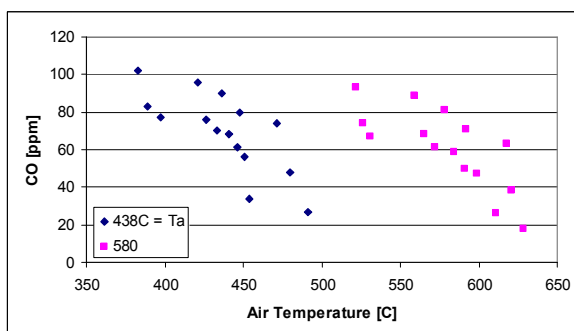
#### ۴-۱- احتراق بدون شعله

در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای ورودی به محفظه احتراق، غلظت NOx در آگروز افزایش می‌یابد که این امر با تئوری و نیز تجارب قبلی تطابق دارد. همچنین، میزان NOx بسیار کم و تقریباً یک رقمی است که این نتیجه نیز در راستای نتایج فعالیت‌های پیشین می‌باشد.



شکل ۲- نمودار غلظت NOx به دمای هوای ورودی برای احتراق بدون شعله

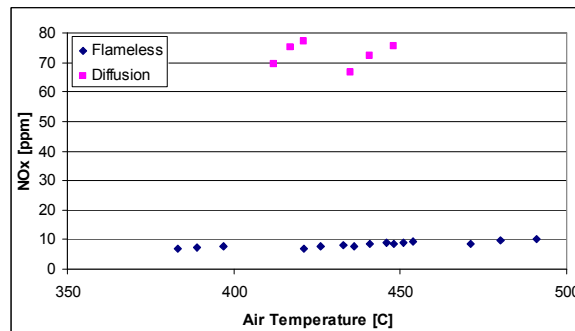
در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش دمای ورودی و بالطبع، افزایش دمای آگروز، غلظت منوکسید کربن کاهش می‌یابد. این کاهش منوکسید کربن، معکوس افزایش NOx در شرایط مشابه است که با تئوری مطابقت دارد.



شکل ۳- نمودار غلظت منوکسید کربن به دمای هوای ورودی برای احتراق بدون شعله

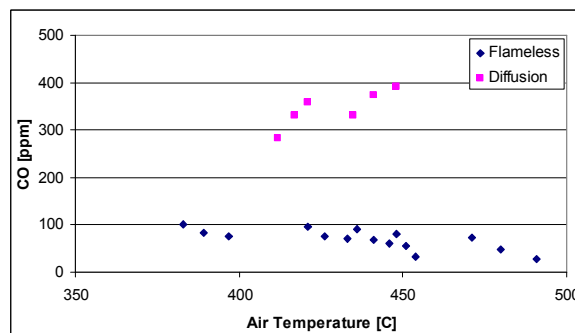
#### ۴-۲- مقایسه احتراق بدون شعله با احتراق با شعله نفوذی

در نمودارهای زیر آلاینده‌گی و دمای آگروز احتراق بدون شعله و احتراق با شعله نفوذی با هم مقایسه می‌شود. دمای هوای ورودی به محفظه احتراق در دو مورد تقریباً با هم برابر هستند (۴۳۸°C برای احتراق بدون شعله و ۴۲۹°C برای احتراق با شعله). به این ترتیب، این نمودارها، مبنای مناسبی برای مقایسه دو رژیم مختلف احتراق می‌باشند. در شکل ۴، غلظت NOx بر حسب دمای هوای ورودی برای دو نوع احتراق ذکر شده رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود اختلاف آنها در حدود یک مرتبه بزرگی (Order of Magnitude) می‌باشد. این امر با نتایج تئوریک و نیز فعالیت‌های تجربی پیشین همخوانی دارد.



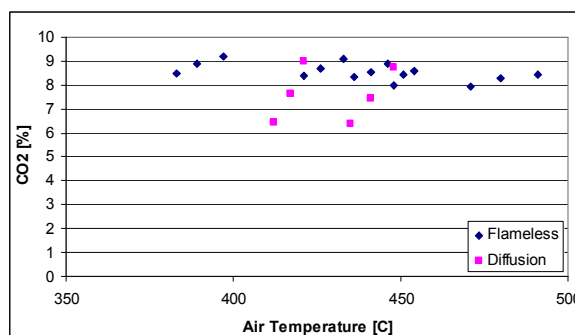
شکل ۴- نمودار غلظت NOx به دمای هوای ورودی برای احتراق با شعله و بدون شعله

منوکسید کربن احتراق بدون شعله از احتراق با شعله نفوذی طبق شکل ۵، کمتر است. این امر، از آنجایی که غلظت NOx دو روش با هم اختلاف شدید دارند، اهمیت به‌سزایی دارد؛ به این معنی که با آن که NOx احتراق بدون شعله بسیار کمتر از شعله نفوذی است، اما CO آن نیز کمتر است. این مساله، مزیت احتراق بدون شعله را در مورد آلاینده‌گی نشان می‌دهد.



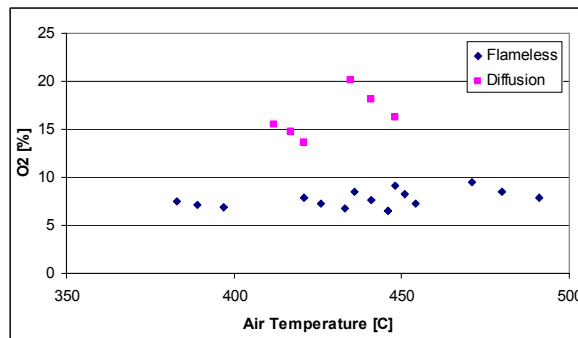
شکل ۵- نمودار غلظت منوکسید کربن به دمای هوای ورودی برای احتراق با شعله و بدون شعله

در شکل ۶ نیز تغییرات دی‌اکسید کربن نسبت به دمای ورودی برای دو روش رسم شده است که غلظت آن برای احتراق بدون شعله اندکی بیشتر از احتراق با شعله نفوذی است. ولی در مجموع از یک مرتبه بزرگی هستند.



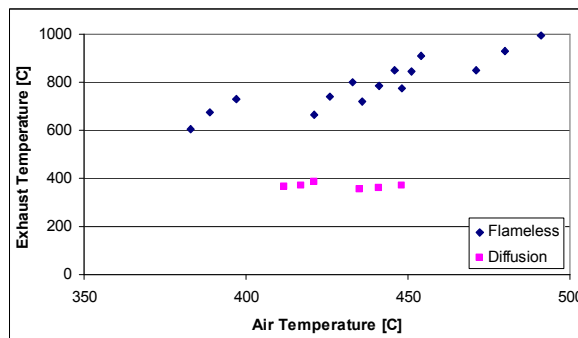
شکل ۶- نمودار غلظت دی‌اکسید کربن به دمای هوای ورودی برای احتراق با شعله و بدون شعله

غلظت اکسیژن، در دو روش اندکی با هم متفاوت است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که میزان اکسیژن در آگروز احتراق با شعله بیش از دو برابر این میزان در احتراق بدون شعله است. علت آن نرخ گردش بالا و سوزش بیشتر در احتراق بدون شعله است. این امر، یعنی پایین آمدن غلظت اکسیژن، که یکی از اهداف احتراق بدون شعله است تا تولید NOx کاهش یابد.



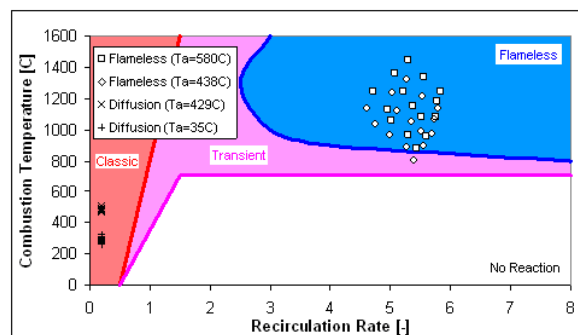
شکل ۷- نمودار غلظت اکسیژن به دمای هوای ورودی برای احتراق با شعله و بدون شعله

همان طور که اشاره شد در احتراق بدون شعله سوزش بهتری انجام می‌شود. در شکل ۸ می‌توان با مقایسه دمای آگزوز دو روش، این موضوع را به خوبی ملاحظه کرد. باید اشاره کرد که با این که دمای آگزوز احتراق بدون شعله بیشتر از احتراق با شعله نفوذی است، اما  $NO_x$  آن بسیار کمتر است.



شکل ۸- نمودار دمای آگزوز به دمای هوای ورودی برای احتراق با شعله و بدون شعله

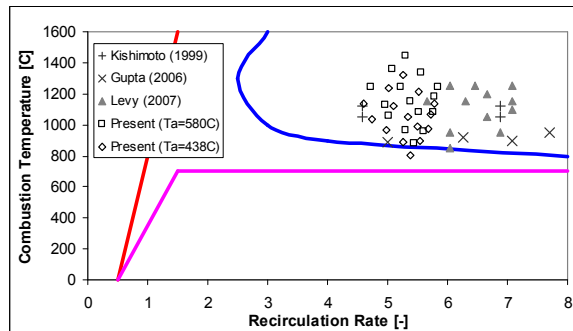
در شکل ۹، نمودار پیشنهاد شده توسط وونینگ و وونینگ [۲] برای رژیم‌های مختلف نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، نتایج کاملاً با تعریف ارائه شده همخوانی دارد و آزمایش‌ها در محدوده تعریف شده نتیجه داده‌اند.



شکل ۹- نمودار دمای احتراق به نرخ گردش برای احتراق با شعله و بدون شعله

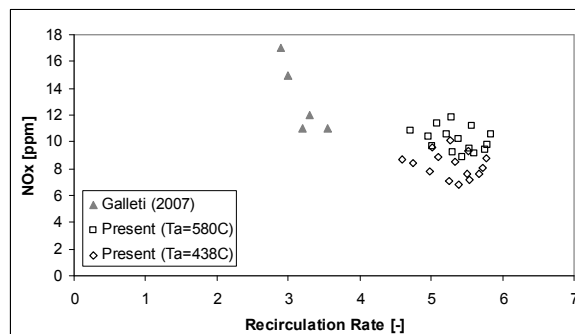


در شکل ۱۰ نمودار دمای احتراق بر حسب نرخ گردش رسم می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود، فعالیت حاضر در دو دمای پیش‌گرم در محدوده تعریف شده احتراق بدون شعله قرار دارد. همچنین، نتایج فعالیت کیشی‌موتو و هاسه‌گاوا [۱۴]، گوپتا [۱۵] و نیز له‌وی و همکارانش [۱۶] در این محدوده مشاهده می‌شود.



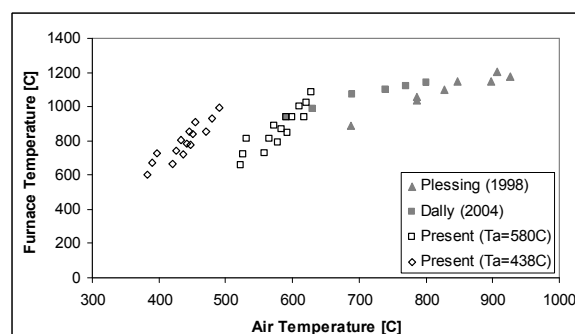
شکل ۱۰- نمودار دمای احتراق به نرخ گردش و مقایسه آن با فعالیت‌های گذشته

غلظت NO<sub>x</sub> بر حسب نرخ گردش با کار گالته‌تی و همکارانش [۱۷] مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، میزان آلاینده‌گی فعالیت اخیر کمتر از فعالیت پیشین [۱۷] بوده است. دلیل این امر، رسیدن به میزان نرخ گردش بیشتر و در نتیجه تولید NO<sub>x</sub> کمتر است.



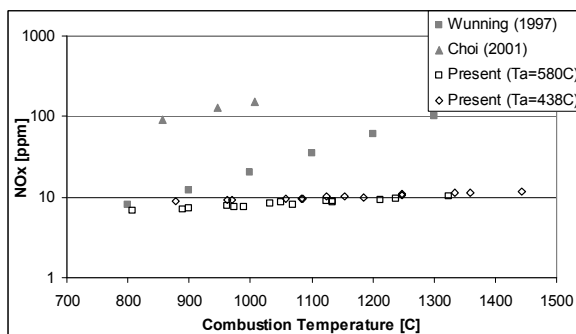
شکل ۱۱- نمودار غلظت NO<sub>x</sub> به نرخ گردش و مقایسه آن با فعالیت‌های گذشته

همچنین، دمای احتراق فعالیت حاضر و کار پلسینگ و همکارانش [۵] و نیز دالی و همکارانش [۹] بر حسب دمای پیش‌گرم هوا در شکل ۱۲ رسم شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، روند همه موارد افزایش دمای احتراق با افزایش دمای هوای پیش‌گرم‌شده و مشابه یکدیگر است.



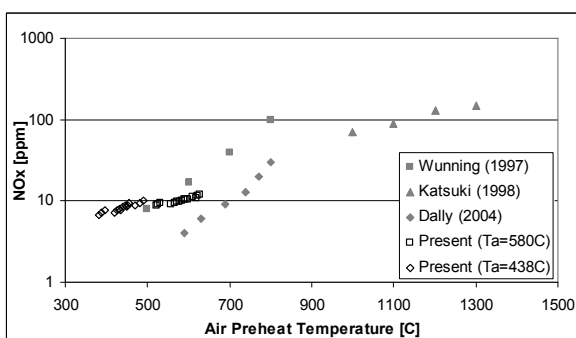
شکل ۱۲- نمودار دمای احتراق به دمای پیش گرم هوا و مقایسه آن با فعالیت‌های گذشته

در شکل ۱۳ نیز غلظت NOx بر حسب دمای احتراق رسم شده و با فعالیت وونینگ و وونینگ [۲] و نیز چوئی و کاتسوکی [۱۸] مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که در همه نتایج، با افزایش این دما، آلاینده‌گی NOx افزایش می‌یابد.



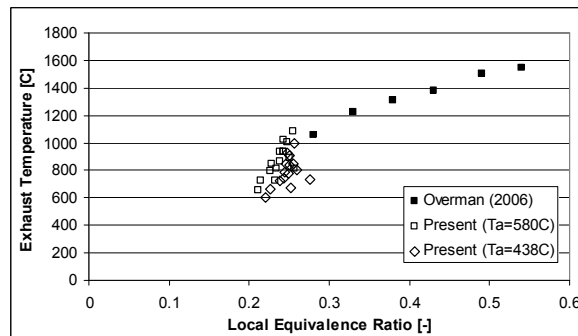
شکل ۱۳- نمودار غلظت NOx به دمای احتراق و مقایسه آن با فعالیت‌های گذشته

در شکل ۱۴، غلظت NOx بر حسب دمای پیش گرم هوای ورودی رسم شده و با فعالیت وونینگ و وونینگ [۲]، کاتسوکی و هاسه‌گاوا [۳] و دالی و همکارانش [۹] مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در همه نتایج، با افزایش این دما، آلاینده‌گی NOx افزایش می‌یابد.

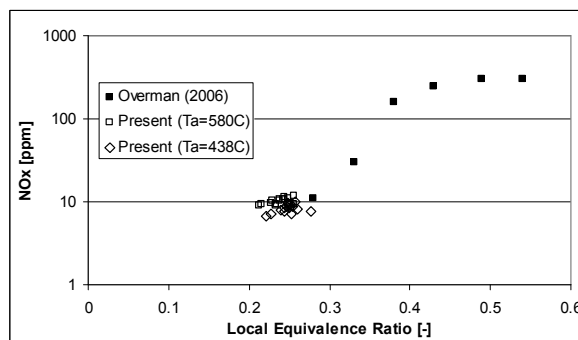


شکل ۱۴- نمودار غلظت NOx به دمای پیش گرم هوا و مقایسه آن با فعالیت‌های گذشته

در دو شکل ۱۵ و ۱۶، به ترتیب دمای آگروز و غلظت NOx بر حسب نسبت تعادل محلی، برای فعالیت حاضر و کار اورمن و همکارانش [۱۲] رسم شده است. نسبت تعادل محلی، بر اساس سوخت و مخلوط هوا و محصولات احتراق گردشی تعریف می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش این نسبت، در هر دو مورد، دمای آگروز و غلظت NOx افزایش یافته است.



شکل (۴-۴۹): نمودار دمای آگزوز به نسبت تعادل محلی و مقایسه آن با فعالیت‌های گذشته



شکل (۴-۵۰): نمودار غلظت NOx به نسبت تعادل محلی و مقایسه آن با فعالیت‌های گذشته

همان طور از مقایسه نتایج به دست می‌آید، محدوده پارامترهای اندازه‌گیری شده و نیز روند کلی آنها، مشابه فعالیت‌های پیشین است. این امر صحت محفظه احتراق طراحی شده و محدوده پارامترهای کنترل شده را اثبات می‌کند. در مورد دمای دمای هوای ورودی به محفظه احتراق بدون شعله باید گفت که در این فعالیت، محدوده آن نسبت به فعالیت‌های پیشین کمتر است. با این حال، در منابع ذکر شده که دمای پیش‌گرم در احتراق بدون شعله از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. به نظر می‌رسد دلیل وقوع احتراق بدون شعله، بدون رسیدن به دماهای بسیار بالای هوای ورودی، گرم شدن محفظه احتراق و عدم استخراج انرژی از آن و در نتیجه بالا رفتن دمای مخلوط سوخت، هوا و محصولات احتراق می‌باشد. لذا در یک مدل غیرآزمایشگاهی که هدف محفظه احتراق یا مشعل، تولید انرژی است، باید دمای پیش‌گرم هوا به دماهای بالاتر ارتقا یابد تا در شرایط مشابه، احتراق بدون شعله اتفاق بیفتد.

## نتیجه‌گیری

احتراق بدون شعله به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در محفظه‌های احتراق، وجود نقاط با دمای اوج بالا، سبب تولید اکسیدهای نیتروژن و نیز کاهش دمای احتراق منجر به کاهش کارایی آن می‌شود. احتراق بدون شعله، راه حلی برای آلاینده‌گی کمتر و کارایی بیشتر است. در این روش احتراق، با پیش‌گرم کردن هوای ورودی و گردش محصولات احتراق در محفظه، منطقه واکنش از یک جبهه محدود به یک ناحیه وسیع‌تر با دمای اوج کمتر پخش شده و به این ترتیب اکسید نیتروژن بسیار کمتری تولید می‌شود. پارامترهای قابل کنترل، دمای پیش‌گرم، نسبت تعادل سوخت به اکسیدکننده، دبی هوا و سوخت می‌باشد. همچنین، با اعمال شرایط مشابه، احتراق بدون شعله با احتراق شعله نفوذی مقایسه شد. پارامترهای قابل اندازه‌گیری، دمای و نیز ترکیب آگزوز خروجی از جمله اکسیدهای نیتروژن است. آلاینده‌گی NOx احتراق بدون شعله بسیار



کمتر و در واقع یک مرتبه بزرگی، کوچکتر از آلاینده‌گی احتراق با شعله نفوذی به دست آمد. همچنین، در دمای هوای ورودی کمتر نسبت به فعالیت‌های پیشین، احتراق بدون شعله به دست آمد که به نظر می‌رسد دلیل آن، گرم شدن محفظه احتراق و عدم استخراج انرژی از آن و در نتیجه بالا رفتن دمای مخلوط سوخت، هوا و محصولات احتراق باشد. با تصویربرداری از محفظه احتراق با امکان دید به داخل نیز، یکنواخت بودن منطقه واکنش پخش شده مشاهده شد. از نتایج این پروژه در طراحی محفظه احتراق موتورهای توربین گازی با هدف کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن و داشتن پروفیل دمایی یکنواخت و همچنین مشعل‌های صنعتی استفاده خواهد شد.

## مراجع

- ۱- عظیمی‌زاده، ا.، "بررسی تجربی احتراق بدون شعله"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا (آئرودینامیک)، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۸.
- 2- Turns, S.R., and Mantel, S.J., *An Introduction to Combustion*, 2nd Edition, McGraw Hill, 2000.
- 3- Williams, A., "Experimental investigation of premixed combustion within highly porous media", Proceeding of the ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, pp. 752-758, 1992.
- 4- Asemi, M.A., Rahimi, M.H., and Fathi, A., "Stochastic modeling of CO and NO in premixed methane combustion", *Combustion and Flame*, Vol. 113, pp 135-146, 1998.
- 5- Wüning J.A. and J.G. Wüning, "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 33, pp. 84-94, 1997.
- 6- Katsuki, M. and T. Hasegawa, "The science and technology of combustion in highly preheated air", *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 27, pp 3135-3146, 1998.
- 7- De Joannon, M., G. Langella, F. Beretia, A. Cavaleire, and C. Noviello, "Mild Combustion: Process Features and Technological Constrains", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 153, pp. 33-50 2000.
- 8- Plessing, T., N. Peters, and J.G. Wüning, "Laseroptical investigation of highly preheated combustion with strong exhaust gas recirculation", 27th Symposium (Intl) on Combust., *Combust. Instit.*, pp. 3197-3204 1998.
- 9- Flamme, M., "Low NOx combustion technologies for high temperature applications", *Energy Convers. and Manag.*, Vol. 42, pp. 1919-1935 2001.
- 10- Özdemir, I.B. and N. Peters, "Characteristics of the Reaction Zone in a Combustor Operating at Mild Combustion", *Experiments in Fluids*, Vol. 30, pp. 683-695, 2001.
- 11- Hasegawa, T., S. Mochida, and A. K. Gupta, "Development of Advanced Industrial Furnace Using Highly Preheated Combustion Air", *Propulsion and Power*, Vol. 18, Issue 2, 2002.
- 12- Dally, B.B., E. Riesmeier, and N. Peters, "Effect of fuel mixture on moderate and intense low oxygen dilution combustion", *Combust. and Flame*, Vol. 137, pp. 418-431, 2004.
- 13- Lückerrath, R., H. Schütz, B. Noll, and M. Aigner, "Experimental Investigations of FLOX Combustion at High Pressure", *Proceedings of Flameless Workshop*, Lund, 2005.
- 14- Li, G., E.J. Gutmark, D. Stankovic, N. Overman, M. Cornwell, L. Fuchs, and V. Milosavljevic, "Experimental study of flameless combustion in gas turbine combustors", AIAA paper 2006-546, 2006.
- 15- Overman, N., M. Cornwell, and E.J. Gutmark, "Application of Flameless Combustion in Gas Turbine Engines", AIAA paper 2006-4920, 2006.
- 16- Duwig, C., D. Stankovic, L. Fuchs, G. Li, and E. Gutmark, "Experimental and Numerical Study of Flameless Combustion in a Model Gas Turbine Combustor", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 180, pp. 279-295, 2008.



انجمن احتراق ایران

FCCI2010-1123

سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی هوافضا

- 17- Kishimoto, K., “*Effective Phenomena for Using Highly Preheated Air Combustion in Practical Combustors*”, AIAA paper 99 0726, 1999.
- 18- Gupta, A.K., “*Developments in High Temperature Air Combustion (Flameless Oxidation) and Fuel Reforming*”, AIAA paper 2006-1498, 2006.
- 19- Levy, Y., V. Sherbaum, and P. Arfi, “Basic thermodynamics of FLOXCOM, the low-NO<sub>x</sub> gas turbines adiabatic combustor”, Appl Thermal Eng., Vol. 17, pp. 1593–1605, 2004.
- 20- Galletti, C., A. Parente, L. Tognotti, “Numerical and experimental investigation of a mild combustion burner”, Combust. and Flame, Vol. 151, pp 649–664, 2007.
- 21- Choi, G.-M., and M. Katsuki, “*Advanced low NO<sub>x</sub> combustion using highly preheated air*”, Energy Conversion and Management, Vol. 42, pp. 639-652, 2001.

## **Experimental study of a non-premixed combustion with preheated air and high recirculation**