

## بررسی آزمایشگاهی همزمان سه روش هوای چرخشی، برگشت گازهای خروجی و سوخت رقیق شده به منظور تک رقمی کردن انتشار $NO_x$

افشین فهیمی راد<sup>۱\*</sup>، پیمان بازیار<sup>۱</sup>، محمد محمودی آریا<sup>۱</sup>، حمید م مهدی هروی<sup>۲</sup>

ایران - مشهد - دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد - آزمایشگاه احتراق

\* نویسنده مخاطب: Afshin\_fahimi\_rad@yahoo.com

### چکیده

کنترل اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) یکی از مسائل کلیدی در طراحی سیستم‌های احتراقی محسوب می‌شود زیرا نقشی اساسی در بروز بیماری‌ها، تخریب لایه ازن، تشکیل باران‌های اسیدی و همچنین مه‌دود فتوشیمیایی دارد. به علت حساسیت مکانیزم تشکیل  $NO$  حرارتی به دما، کاهش دمای شعله یک راه حل علمی و عملی برای محدود کردن شکل‌گیری  $NO$  حرارتی که بخش عمده آلاینده  $NO_x$  است به حساب می‌آید. برگشت گازهای خروجی به محفظه احتراق به همراه هوای ورودی (FGR) و رقیق‌سازی سوخت ورودی به محفظه احتراق (FIR) دمای شعله را کاهش داده و بدین وسیله نرخ واکنش را نیز کم می‌کند که نتیجه آن کاهش در تولید  $NO_x$  حرارتی است. نتایج آزمایشگاهی با ساخت کوره ای با محفظه احتراق استوانه ای و دارای تقارن محوری بدست آمده است. در تحقیق حاضر، مطالعه تجربی بر روی شعله‌های چرخشی پیش آمیخته پروپان- هوا با اعداد چرخش مختلف صورت گرفته است. آزمایشات برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰٫۷ تا ۱٫۳ و درصد گازهای برگشتی از ۰ تا ۲۰ درصد، نسبت رقیق‌سازی از ۰ تا ۰٫۴ و عدد چرخش از ۰ تا ۱٫۲ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد در نسبت هم‌ارزی ۱ که مقدار  $NO_x$  بیشینه است با ترکیب سه روش فوق می‌توان انتشار  $NO_x$  را تک رقمی ساخت.

واژه‌های کلیدی: برگشت گازهای خروجی، رقیق‌سازی، چرخش،  $NO_x$

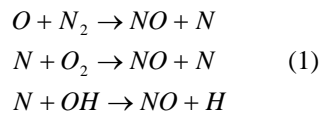
### ۱- مقدمه

از زمان برپایی آتش، آلودگی هوا همواره همراه انسان بوده است. در مقیاس کوچک، آلودگی‌های محلی از این لحاظ که باعث بیماری‌های خطرناک و دیرعلاج شده، بسیار مورد توجه بوده و در مقیاس جهانی به لحاظ آثار سوء بر محیط زیست و مسائلی چون تخریب لایه ازن، باران‌های اسیدی و گرمایش زمین مورد توجه و بحث قرار گرفته اند. منشاء آلودگی هوا در اوایل انقلاب صنعتی، عمدتاً صنایع و سوخت زغال سنگ بوده ولی امروزه منشاء این آلودگی در شهرها حمل و نقل درون شهری می‌باشد [1]. در انواع اکسیدهای نیتروژن،  $NO_2$  و  $N_2O$  تاثیر مخرب بیشتری روی اتمسفر دارند. در کوره‌ها عموماً  $NO$  تولید می‌شود که خود  $NO$  در هوا واکنش داده و به تدریج به  $NO_2$  تبدیل می‌شود [2]. مجموع  $NO$ ،  $NO_2$  و  $NO_x$  نامیده می‌شود. تشکیل  $NO_x$  در کوره‌های صنعتی مسئله پیچیده‌ای است که از پارامترهای موثر در تشکیل  $NO_x$  ناشی می‌شود. تشکیل  $NO_x$  در طی فرآیند احتراق در کوره‌ها ناشی از ۳ مکانیزم  $NO_x$  حرارتی،  $NO_x$  فوری و  $NO_x$  سوخت است [3]. کوره‌ها چون تحت شرایط پر اکسیژن کار می‌کنند، شرایط برای تولید  $NO_x$  فوری فراهم نبوده و به این دلیل که سوخت‌های گازی حاوی نیتروژن نیستند  $NO_x$  سوخت نیز تشکیل نمی‌شود و اغلب  $NO_x$  حرارتی تولید می‌شود [4]. در رابطه ۱ واکنش‌های

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، کارشناس واحد تحقیق و توسعه شرکت دیزل سنگین ایران

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

تشکیل NO زلدوویج مشاهده می شود. این واکنش ها به عنوان واکنش های تشکیل NO حرارتی نیز نامیده می شوند، زیرا واکنش اول به علت پیوند سه گانه قوی در مولکول N<sub>2</sub> دارای انرژی فعال سازی بسیار بالا است، بنابراین فقط در دماهای به اندازه کافی زیاد سریع است، در غیر این صورت واکنش اول، مرحله محدود کننده تشکیل NO حرارتی است.



رابطه تولید NO حرارتی در رابطه ۲ نشان داده شده است [5].

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

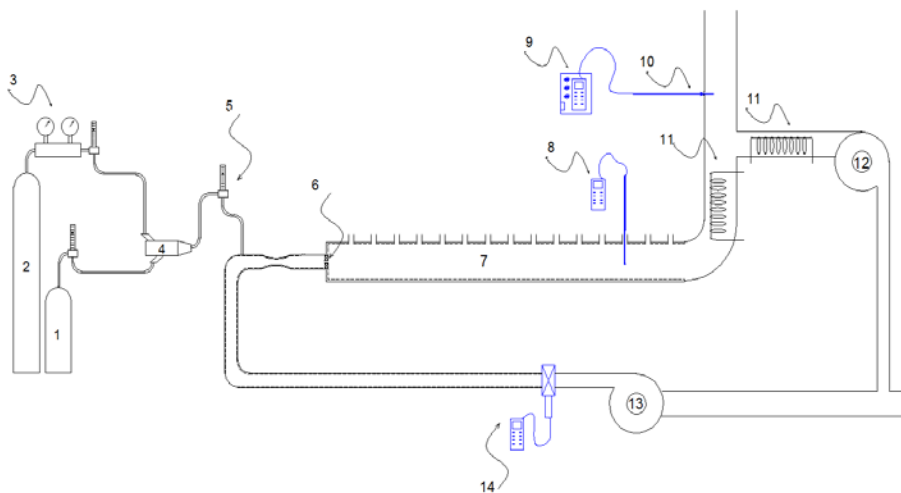
در این رابطه K<sub>1</sub> و K<sub>2</sub> ثابت های سینتیکی واکنش های اول و دوم معادله ۱، t زمان و T دما است، همچنین براکت نشان دهنده غلظت می باشد. اعمال فرآیندهای حین احتراقی از قبیل احتراق مرحله ای، ایجاد جریان چرخشی، بازگرداندن گازهای خروجی به محفظه احتراق (FGR) و همچنین رقیق سازی سوخت از راهکارهای مهم جهت کاهش دمای محفظه احتراق و در نتیجه کاهش آلاینده NO<sub>x</sub> بحساب می آیند. احتراق چرخشی به گستردگی در محفظه های احتراق توربین گاز، مشعل های چرخشی و محفظه های احتراق چرخشی بکار گرفته شده است [6,7]. ایده استفاده از چرخش برای افزایش اغتشاش و کاهش تشکیل NO<sub>x</sub> توسط بیر پیشنهاد داده شد [8]. جریان چرخشی در ۲ دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است که تقریباً بطور کامل در مطالعه علمی سایرد تشریح شده است [9]. چرخش نه تنها می تواند بر مشخصات احتراق اثر بگذارد بلکه بر تشکیل NO<sub>x</sub> نیز تاثیر می گذارد [10]. اکثر محققین کاهش در تشکیل NO<sub>x</sub> را با افزایش در عدد چرخش گزارش می دهند [11]. تغییر عدد چرخش بر ناحیه جریان شامل محل، اندازه، ناحیه برگشت و دمای شعله، توزیع غلظت گونه ها و شدت آشفتهگی اثر خواهد گذاشت. همه این تغییرات در تشکیل NO<sub>x</sub> موثر است [10]. از دیگر دلایل استفاده از چرخنده، تأثیر آن در جلوگیری از پس زنی احتمالی شعله بخصوص در حالت شعله پیش آمیخته می باشد. رقیق سازی نیز بعنوان یک خط مشی جهت دستیابی به انتشار NO<sub>x</sub> کمتر در بسیاری از مقالات مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. از جمله رقیق کننده هایی که سبب رقیق سازی مخلوط سوخت و هوا و کاهش غلظت اکسیژن می شوند عبارتند از: CO<sub>2</sub>، N<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O که ظرفیت حرارتی بالای این گونه ها سبب افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط، جذب حرارت ناشی از احتراق و در نتیجه کاهش دمای شعله و NO<sub>x</sub> تولیدی می شود. رقیق کننده های دیگر مورد استفاده شامل H<sub>2</sub>، CO، Ar، He و حتی NO بوده که هر یک به نحوی منجر به کاهش انتشار آلاینده NO<sub>x</sub> می شوند [12-14]. به لحاظ اهمیت موضوع کنترل انتشار آلاینده ها، تحقیقات گسترده ای در این زمینه صورت گرفته است. از این رو رقیق سازی نیز به عنوان یک راه کار حین احتراقی که سبب کاهش چشمگیر آلاینده NO<sub>x</sub> می شود در بسیاری از پژوهش ها مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۲ دیوید لیتل جان و همکاران [15]، بر روی رقیق سازی شعله های پخشی در بویلرهای صنعتی و تأثیر آن بر انتشار آلاینده های NO<sub>x</sub> و CO در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن اندکی رقیق کننده، میزان انتشار آلاینده ها را کاهش می دهد. دالی و همکاران [16] در سال ۲۰۰۴، تحقیقاتی را بر روی رقیق سازی احتراق با CO<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> انجام دادند. کوره طراحی شده یک محفظه به ابعاد ۲۵۰ × ۲۵۰ میلی متر و ارتفاع ۴۸۵ میلی متر بوده که شش پنجره از جنس کوارتز به منظور مشاهده شعله بر روی آن تعبیه شده است. با طراحی یک مبدل حرارتی از گرمای گازهای خروجی برای گرم کردن هوای ورودی استفاده شده است. برای اندازه گیری دما در محور مرکزی کوره از ترموکوپل نوع K و برای آنالیز گازهای خروجی (که NO<sub>x</sub> هم جزئی از آنهاست)، از دستگاه آنالیز گاز مدل Testo 300 M استفاده شده است. نتایج این تحقیقات نشان می دهد که رقیق سازی با N<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub>، انتشار NO<sub>x</sub> را کاهش داده و باعث می شود که شعله در داخل کوره نامرئی به نظر آید. در همین سال، سالواد و همکاران [17]، بر روی رقیق سازی گاز طبیعی با N<sub>2</sub> تحقیقاتی را انجام دادند. سطح مقطع کوره طراحی شده ۳۶۰ × ۳۲۰ میلی متر و طول آن ۳ متر در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که افزودن N<sub>2</sub>، در حدود ۶۰٪ میزان انتشار NO<sub>x</sub> را

کم می‌کند. برگشت گازهای خروجی نیز تکنیکی موثر در صنایع است که بخشی از گازهای خروجی به وسیله فن دما بالا مجدداً به درون محفظه احتراق یا هوای احتراق تزریق می‌شود. با تزریق گازهای خروجی، سنگینی گازهایی که در احتراق شرکت ندارند افزایش یافته که همین امر سبب کاهش حداکثر دمای شعله می‌شود [18]. از جمله گازهای مهم موجود در گازهای برگشتی که سبب رقیق سازی مخلوط سوخت و هوا و کاهش غلظت اکسیژن می‌شوند، گونه های  $H_2O$  ،  $CO_2$  هستند که ظرفیت حرارتی بالای این گونه ها سبب افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط، جذب حرارت ناشی از احتراق و در نتیجه کاهش دمای شعله و  $NO_x$  تولیدی می‌شود [19]. ماتسو موتو و همکارانش [20] به بررسی اثر برگشت گازهای خروجی بر تشکیل آلاینده  $NO_x$  پرداخته اند، که نتایج نشان دهنده کاهش انتشار  $NO_x$  با افزایش حضور گازهای برگشتی است. لازیک و همکارانش [21] نیز به بررسی آزمایشگاهی تاثیر برگشت گازهای خروجی به محفظه احتراق بر میزان انتشار  $NO_x$  پرداخته اند که نتایج نشان دهنده کاهش ۸۰ درصدی انتشار  $NO_x$  با برگشت ۲۰ درصد از گازهای خروجی به محفظه احتراق است. کیون کیم و یانگ کیم [22] نشان داده اند برگشت گازهای خروجی به همراه اکسید کننده به محفظه احتراق سبب افزایش شدت توربلانسی می‌شود که عاملی موثر در راستای کاهش طول شعله و دمای محفظه احتراق است. نتایج تجربی نشان می‌دهد نسبت های بالای درصد برگشت گازهای خروجی و نسبت رقیق سازی سوخت ورودی سبب ایجاد شعله ی ناپایدار خواهد شد [23]. چرخش روشی برای پایدار کردن شعله، بالا بردن و کنترل انتقال حرارت است [24,25]. همچنین چرخشی کردن مخلوط ورودی نیز به تنهایی قدر به کاهش حداکثری انتشار  $NO_x$  نمی‌باشد. در نتیجه در این تحقیق هدف کمینه ساختن انتشار  $NO_x$  با بهره گیری همزمان از سه روش برگشت گازهای خروجی، رقیق سازی سوخت ورودی و چرخش مخلوط ورودی است.

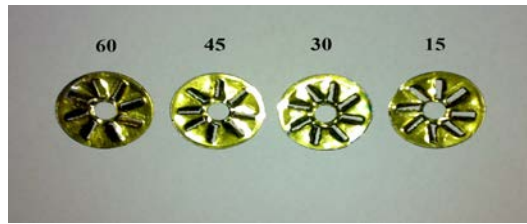
## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

جهت انجام آزمایش ها در راستای بررسی اثر برگشت گازهای خروجی به همراه هوای ورودی به محفظه احتراق، رقیق سازی سوخت ورودی و ایجاد مخلوط ورودی چرخشی بر تشکیل آلاینده  $NO_x$ ، کوره ای بدین منظور طراحی و ساخته شده است. بدنه اصلی کوره یا محفظه احتراق را لوله فولادی AISI316 تو خالی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۱۰۰۰ میلی‌متر تشکیل می‌دهد که قابلیت تحمل دماهای بالا را دارد. هوای مورد نیاز برای احتراق در نسبت های مختلف هم ارزی توسط فن هوا که دریچه ای به منظور تغییر در دبی هوا ورودی روی آن تعبیه شده است تامین می‌گردد. سوخت و رقیق کننده پس از اختلاط در کلکتور، و اختلاط با هوای ورودی از طریق لوله‌ای به قطر ۳۵ میلی‌متر وارد محفظه احتراق شده و سپس با ایجاد جرقه احتراق صورت می‌گیرد. محفظه احتراق از عایق پنبه‌هندی 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 هم در بالای بدنه محفظه احتراق تعبیه شده است. جهت اختلاط بهتر سوخت و رقیق کننده، از یک کلکتور استفاده شده است. دبی سوخت و رقیق کننده قبل از ورود به کلکتور اندازه‌گیری شده و سپس وارد کلکتور می‌شوند. با طراحی کلکتورهای مختلف به منظور به حداقل رساندن اتلافات، کلکتور بهینه طراحی شد که در آن طول شلنگ‌های اتصال، کوتاه در نظر گرفته شده و ورودی‌های سوخت و رقیق کننده تحت زاویه ۴۵ درجه وارد کلکتور می‌شوند. ورودی‌های سوخت و رقیق کننده به کلکتور باید به گونه‌ای تعبیه شوند که روبروی هم نباشند زیرا ممکن است موجب پس‌زنی جریان‌ها به داخل یکدیگر شوند. در کلکتورهای اولیه زیاد بودن حجم کلکتور و قائم بودن زاویه ورودی سوخت و رقیق کننده به کلکتور و همچنین بلند بودن طول شلنگ‌های اتصال، سبب افزایش اتلافات و ایجاد مشکل در سیستم اختلاط شده است. به منظور کاهش فشار کپسول  $CO_2$  (۷۰ بار)، از رگلاتور مخصوص گاز  $CO_2$  استفاده شده است که فشار داخل آن را تا ۲/۵ بار که فشار مطلوب بوده کاهش داده تا با فشار سوخت اصلی هنگام ورود به کلکتور هم‌فشار شود. این کاهش فشار سبب می‌شود که بدنه کپسول  $CO_2$ ، رگلاتور و رواتر اندازگی دبی  $CO_2$  یخ زده و دچار مشکل شود. برای غلبه بر این مشکل از گرمکن مخصوص کپسول گاز  $CO_2$  استفاده شده

است. همچنین وجود و نتوری در مسیر ورودی مخلوط پیش آمیخته متان- هوا سبب جلوگیری از پس زنی احتمالی شعله خواهد شد. جهت مکش بخشی از گازهای خروجی دودکش و بازگرداندن آنها به محفظه احتراق از یک فن بهره برده شده است. به منظور اثر بخشی بیشتر روش برگشت گازهای خروجی در کاهش آلاینده  $NO_x$ ، گازهای خروجی طی دو مرحله، ابتدا در دودکش اصلی و سپس در لوله برگشت توسط مبدل حرارتی ساخته شده که درون لوله ها قرار گرفته است حرارت خود را از دست می دهند. مبدل حرارتی از لوله مسی به قطر ۶ میلیمتر بصورت ماریچج با قطر ۷۰ و طول ۸۰۰ میلیمتر ساخته شده است که آب از داخل آن جریان دارد. آب با دبی ۲،۱۵ لیتر بر دقیقه در مبدل اول و در مبدل دوم با دبی ۱،۶ لیتر بر دقیقه جریان دارد. میزان مکش گازهای دودکش به درون مدار گازهای برگشتی توسط دریچه ای که بر روی فن قرار دارد، قابل تنظیم است که از ۰ تا ۲۰ درصد قابل تغییر می باشد. طبقه محاسبه درصد گازهای برگشتی بدین صورت است که دبی گازهای خروجی از دودکش در حالت بدون برگشت گازهای خروجی، توسط فلومتر بدست آمده و سپس با راه اندازی مدار گازهای برگشتی دبی کاهش یافته را محاسبه و درصد گازهای برگشتی به محفظه احتراق تعیین می شود. گازهای برگشتی پس از مکش به همراه هوای ورودی وارد محفظه احتراق می شود. برای ایجاد جریان احتراقی چرخشی، چرخنده های با زاویه تیغه مختلف برای دستیابی به جریان های چرخشی با اعداد چرخش مختلف نصب شده است که در شکل ۲ مشاهده می شود. مقدار گونه های 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 ای اندازه گیری آن برای آلاینده  $NO_x$ ، 0 - 3000 ppm می باشد) با قرار دادن حسگر مربوط در لوله دودکش اندازه گیری می شود. دقت اندازه گیری های صورت گرفته 5 ppm ± برای غلظت های کمتر از 100 ppm می باشد. برای اندازه گیری دبی هوا از دستگاه فلومتر Lutron YK-2005 AM و برای اندازه گیری دبی سوخت ورودی از روتامتر SWPF-06 A که قابلیت اندازه گیری دبی حجمی سوخت در محدوده 0 - 40 lit/min را دارد، استفاده شده است. دقت در محدوده سرعت های اندازه گیری شده توسط دستگاه فلومتر 0.05 ~ 0.1 m/s بوده و میزان دقت تعریف شده در دامنه ای دبی های اندازه گیری شده توسط روتامتر 0.02 lit/min ± می باشد. همچنین فلومتر قابلیت نشان دادن دما از طریق اتصال به حسگر مربوطه را دارد. برای اندازه گیری دما از حسگر نوع K که قابلیت اندازه گیری دما تا ۱۳۰۰ کلوین را دارد استفاده شده است. تمامی تجهیزات پیش از انجام آزمایش کالیبره شده تا از بروز خطای احتمالی در داده های آزمایشگاهی ثبت شده تا حد امکان جلوگیری شود. آزمایشات در آزمایشگاه احتراق دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد انجام شده است.



شکل ۱- طرحواره سامانه آزمایش، ۱: مخزن پروپان، ۲: مخزن دی اکسید کربن، ۳: رگلاتور و گرمکن، ۴: کلکتور، ۵: روتامتر، ۶: چرخنده، ۷: محفظه احتراق، ۸: ترموکوپل، ۹: آنالیزور گاز، ۱۰: حسگر آنالیزور، ۱۱: مبدل حرارتی، ۱۲: فن گازهای برگشتی، ۱۳: فن هوا، ۱۴: فلومتر



شکل ۲- چرخنده های ورودی

### ۳- میزان خطا در داده های آزمایشگاهی

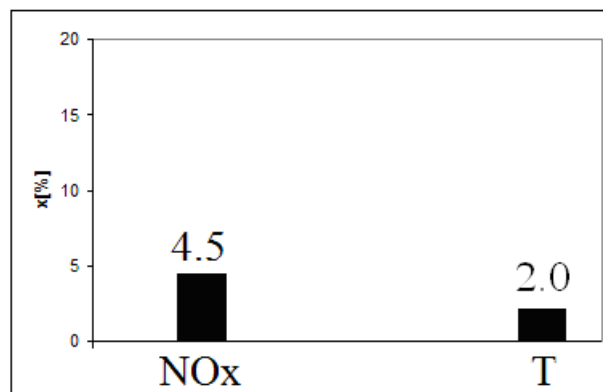
خطاهای ثابت و تصادفی خطاهایی هستند که ممکن است در یک اندازه گیری تجربی سبب عدم قطعیت گردند، معمولاً خطاهای ثابت با کالیبره نمودن وسایل اندازه گیری از بین می روند ولی خطاهای تصادفی از طریق تحلیل آماری شناسایی می شوند. در این پژوهش ابتدا برای هر نقطه، چهار داده آزمایشگاهی جمع آوری شده است و سپس میانگین حسابی داده ها محاسبه و به عنوان داده نهائی آزمایشگاهی استفاده می شود. مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده ها از فرمول زیر محاسبه شده است.

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{n^{0.5}} \quad (2)$$

در این فرمول  $\sigma_m$  انحراف معیار مقدار میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار مجموعه اندازه گیریها و  $n$  تعداد اندازه گیریها در هر نقطه می باشد. مقدار درصد عدم قطعیت ( $x$ ) داده های آزمایشگاهی از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$X \% = \frac{\sigma_m}{\bar{x}} \times 100 \quad (3)$$

که در آن  $\bar{x}$  مقدار میانگین حسابی داده های آزمایشگاهی می باشد. در شکل ۵ مقادیر عدم قطعیت داده های آزمایشگاهی که برای درصد گازهای برگشتی و نسبت های مختلف هم ارزی متوسط گیری شده، نشان داده شده است.



شکل ۵- مقادیر عدم قطعیت برای NO<sub>x</sub> در خروجی و دما در فاصله 600mm از ابتدای محفظه احتراق

### ۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی تاثیر برگشت گازهای خروجی و رقیق سازی سوخت ورودی بر انتشار آلاینده NO<sub>x</sub> در شعله های پیش آمیخته نفوذی پروپان هوا، آزمایشات در دامنه ای از نسبت هم ارزی که شامل ناحیه کم سوخت، استوکیومتری و پرسوخت است انجام شده است. برای تعیین عدد چرخش از رابطه زیر استفاده شده است:

$$S = \frac{2 \tan \theta (1 - \sigma_r^3)}{3 (1 - \sigma_r^2)} \quad (4)$$

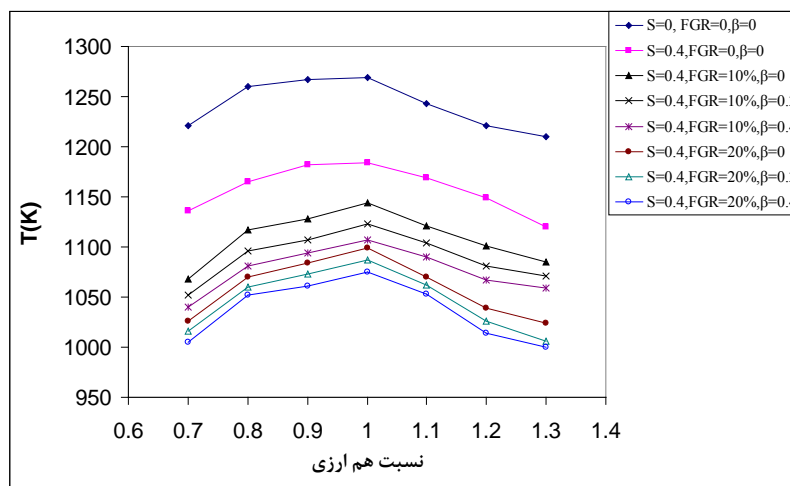
که  $\theta$  زاویه پره و  $\sigma_r$  نسبت قطر داخلی به قطر خارجی چرخنده است. زوایای پره استفاده شده در این تحقیق ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه است. قطر داخلی چرخنده ۸ میلیمتر و قطر خارجی آن ۳۵ میلیمتر است. بنابر این اعداد چرخش بترتیب ۰، ۱، ۲ است. برای محاسبه درصد گازهای برگشتی از رابطه ۵ استفاده شده است.

$$FGR\% = \frac{(m)_{\text{recycle gas}}}{(m)_{\text{flue gas}}} \quad (5)$$

که نسبت دبی جرمی گازهای برگشتی به گازهای خروجی، معرف درصد گازهای بازگردانده شده است.  $\beta$  که معرف نسبت رقیق سازی است از رابطه ۶ محاسبه شده است. این مقدار شامل نسبت تعداد مول های رقیق کننده به مول سوخت می باشد.

$$\beta = \frac{n_{\text{Diluent}}}{n_{\text{Fuel}}} \quad (6)$$

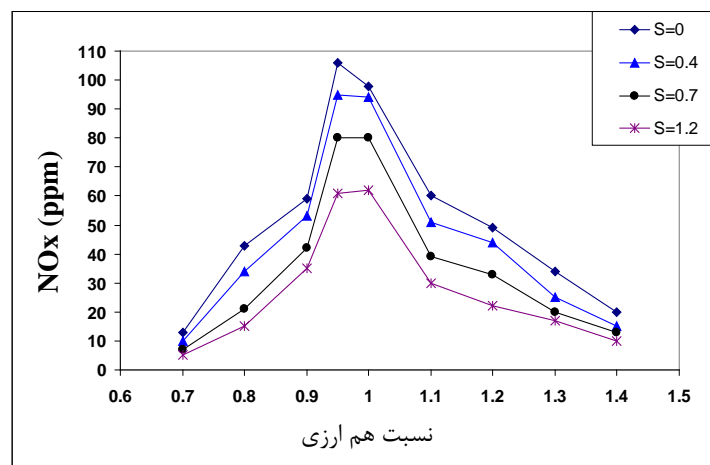
شکل ۶ تاثیر برگشت گازهای خروجی به همراه سوخت رقیق شده به محفظه احتراق را بر دمای محفظه احتراق در فاصله ۶۰۰ میلیمتری از ابتدای محفظه، در عدد چرخش ۰،۴ نشان می دهد.



شکل ۶- تاثیر چرخشی کردن هوا، برگشت گازهای خروجی و رقیق سازی بر دمای مرکز محفظه احتراق در فاصله ۶۰۰ میلیمتری از ابتدای محفظه

چرخشی کردن جریان ورودی، منجر به بازگشت درونی جریان ایجاد می شود. در حالت جریان چرخشی سراسر ساختار ناحیه جریان گاز اساساً می تواند به سه قسمت تقسیم شود: ناحیه برگشت ماریچی مرکزی (CTRZ)، ناحیه برگشت گوشه (CRZ) و لایه های برشی دوتایی (لایه های داخلی CTRZ و لایه های بیرونی اطراف CTZ). در واقع چرخش ایجاد یک نوع FGR درونی می کند که کاهش حداکثر دمای شعله و متعاقباً دمای محفظه در فاصله ۶۰۰ میلیمتری را در پی خواهد داشت. از آنجا که بیش از ۹۵ درصد گازهای خروجی را گونه های  $H_2O$ ،  $N_2$  و  $CO_2$  شامل می شوند و هر سه گونه نوعی رقیق کننده می باشند با افزودن درصدی از گازهای خروجی به درون هوای ورودی، دمای محفظه احتراق کاهش می یابد. با افزایش نسبت

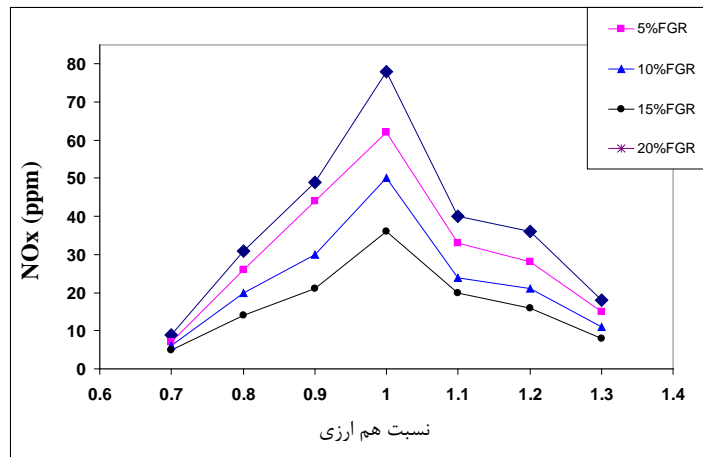
رقیق کننده کاهش در دمای احتراق وضوح بیشتری خواهد یافت. علت این کاهش دما را باید در کاهش کسر مولی اکسیژن ورودی به دلیل افزودن گونه های برگشتی و رقیق ساز در هوا و سوخت ورودی جستجو نمود. همچنین گونه هایی مانند دی اکسید کربن و آب ظرفیت گرمایی بالایی داشته و گرمای آزاد شده احتراق را جذب می کنند که سبب کاهش دمای محفظه احتراق می شود. پیوند قوی سه گانه مولکول نیتروژن و انرژی اکتیواسیون بالا برای شکستن پیوند در کاهش دمای شعله بی تاثیر نیست. همچنین مشاهده می شود در نسبت هم ارزی ۱ دما نسبت به سایر نسبت های هم ارزی بیشتر است که به دلیل احتراق کامل در حالت استوکیومتری و حضور اکسیژن لازم جهت اکسیداسیون کامل سوخت می باشد. شکل ۷ انتشار  $NO_x$  را در دامنه ای از نسبت هم ارزی برای اعداد چرخش متفاوت نشان می دهد. طی آزمایشات انجام شده حداکثر مقدار  $NO_x$  در نسبت هم ارزی ۰,۹۵ مشاهده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش نسبت هم ارزی از ۰,۷ تا نسبت هم ارزی نزدیک به حالت استوکیومتری، یعنی نسبت هم ارزی ۰,۹۵ میزان انتشار  $NO_x$  روندی صعودی طی می کند و بعد از این مقدار بیشینه، با ورود به ناحیه پرسوخت با افزایش نسبت هم ارزی،  $NO_x$  کاهش می یابد. علت این تغییر در انتشار  $NO_x$ ، دمای محفظه احتراق و غلظت اکسیژن و نیتروژن در مخلوط پیش آمیخته ورودی و همچنین کاهش زمان ماند است. از آنجا که دما در معادله تشکیل  $NO_x$  حرارتی به صورت نمایی ظاهر می شود، مهم ترین پارامتر در انتشار  $NO_x$  است و مشاهده می شود که نوع ساختار نمودار انتشار  $NO_x$  با نمودار دما در شکل ۶ همخوانی دارد.



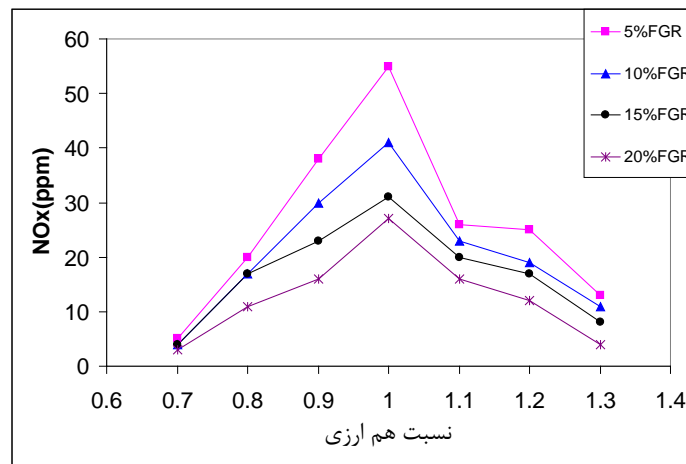
شکل ۷- تاثیر چرخش مخلوط ورودی بر انتشار  $NO_x$

همچنین در ناحیه کم سوخت به دلیل فقدان سوخت جهت احتراق کامل، اکسیداسیون نیتروژن موجود به کندی صورت می پذیرد. در نتیجه افزایش دما سبب افزایش میزان انتشار  $NO_x$  می شود. در نسبت هم ارزی ۰,۹۵ آلاینده  $NO_x$  به بیشترین مقدار خود می رسد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش عدد چرخش در تمامی نسبت های هم ارزی،  $NO_x$  کاهش می یابد. علت کاهش شدید  $NO_x$  در اعداد چرخش بالاتر، به علت ایجاد چرخش داخلی شدید یا همان CTRZ است. این نوع چرخش موجب اختلاط شدیدتر سوخت و هوا می شود و مقداری از محصولات احتراق تشکیل شده در ابتدای شعله بازگشت کرده و مجدداً وارد واکنش شده است و از آن جهت که برخی از گونه های موجود دارای ظرفیت حرارتی بالایی هستند حرارت ناشی از احتراق را جذب کرده که این دو عامل باعث کاهش  $NO_x$  در عدد چرخش بالا می شود. شکل های ۸، ۹ و ۱۰ تاثیر برگشت گازهای خروجی به همراه هوای ورودی به محفظه احتراق بر کاهش انتشار  $NO_x$  را نشان می دهد.

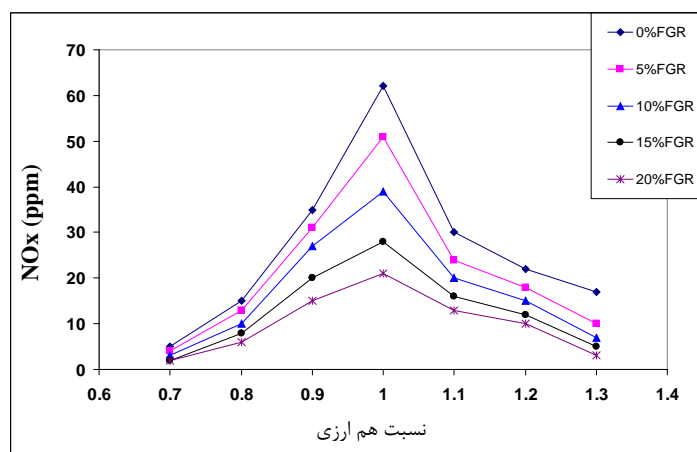




شکل ۸- تاثیر برگشت گازهای خروجی در عدد چرخش 0.4 بر انتشار  $NO_x$



شکل ۹- تاثیر برگشت گازهای خروجی در عدد چرخش 0.7 بر انتشار  $NO_x$

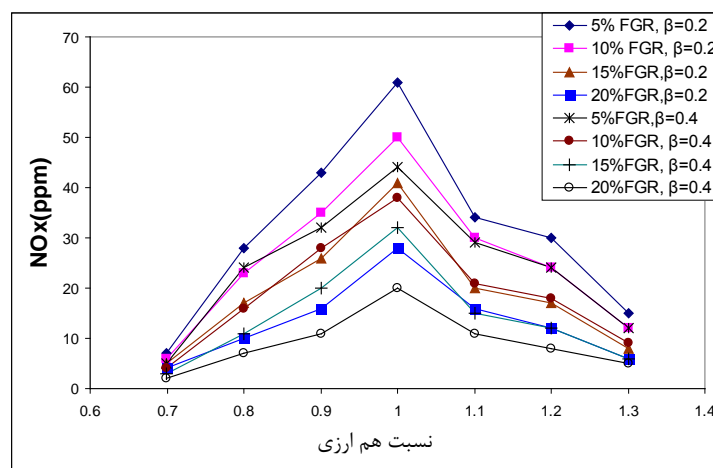


شکل ۱۰- تاثیر برگشت گازهای خروجی در عدد چرخش 1.2 بر انتشار  $NO_x$

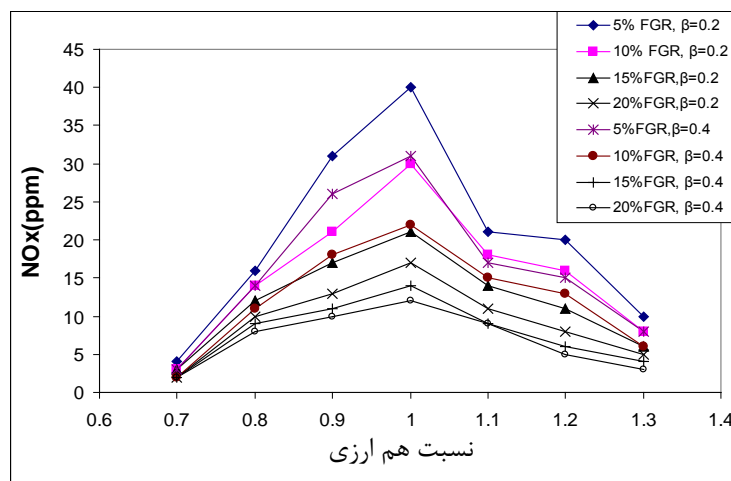
همانطور که از شکل های بالا مشاهده می شود، انتشار  $NO_x$  با افزایش درصد گازهای برگشتی کاهش یافته است. از آنجا که اصلی ترین عامل در تشکیل  $NO_x$  دما است، تمامی عواملی که سبب کاهش حداکثر دمای شعله و در نتیجه کاهش دمای



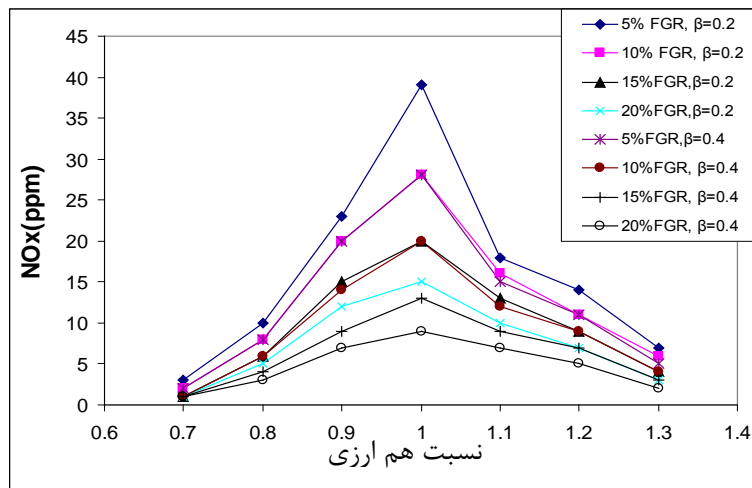
محفظه احتراق می شوند عواملی موثر در کاهش انتشار  $\text{NO}_x$  هستند. اثر رقیق سازی گازهای برگشتی، افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط به دلیل حضور گونه هایی با ظرفیت حرارتی بالا، کاهش غلظت اکسیژن در ورودی، افزایش توربلانسی و کاهش زمان ماند از دلایل کاهش دمای شعله و در نتیجه کاهش انتشار  $\text{NO}_x$  می باشد. هرچند بازگرداندن گازهای خروجی موجب پیش گرمایش هوای ورودی می شود اما، عوامل نام برده شده بر تک علت افزایش دمای شعله برتری دارد. با کاهش کسر مولی اکسیژن، فشار جزئی آن کاهش یافته که بر روی سنیتیک بنیادی واکنش  $\text{NO}_x$  اثر گذاشته و نرخ تولید را کاهش می دهد. همچنین با افزایش عدد چرخش از شکل ۷ تا شکل ۹، سطح انتشار  $\text{NO}_x$  نیز کاهش یافته است. به منظور اثر بخشی بیشتر روش های کاهش  $\text{NO}_x$  در مرحله بعد از کار تجربی، رقیق کننده  $\text{CO}_2$  به همراه سوخت ورودی وارد محفظه احتراق شده است که نتایج مربوط به انتشار  $\text{NO}_x$  در شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. حضور رقیق کننده به ترتیب سبب افزایش و کاهش بیشتر ظرفیت حرارتی مخلوط (به این دلیل که ظرفیت حرارتی  $\text{CO}_2$  برابر با  $2.9 \text{ KJ/Kg.K}$  می باشد) و کسر مولی اکسیژن در ورودی می شود که این امر کاهش دمای شعله را در پی دارد. از طرفی از آنجا که واکنش انفکاک  $\text{CO}_2$  گرماگیر است، گرمای مورد نیاز را از شعله دریافت و سبب کاهش دمای شعله و انتشار آلاینده  $\text{NO}_x$  خواهد شد.



شکل ۱۱- تاثیر برگشت گازهای خروجی و رقیق سازی سوخت ورودی در عدد چرخش ۴، بر انتشار  $\text{NO}_x$

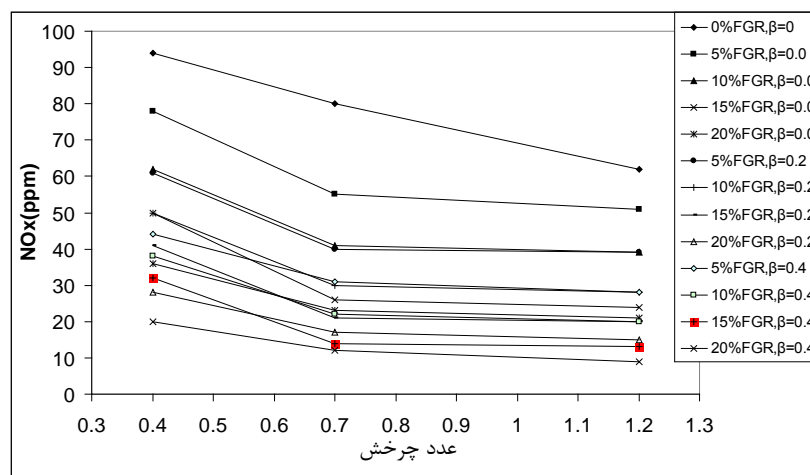


شکل ۱۲- تاثیر برگشت گازهای خروجی و رقیق سازی سوخت ورودی در عدد چرخش ۷، بر انتشار  $\text{NO}_x$



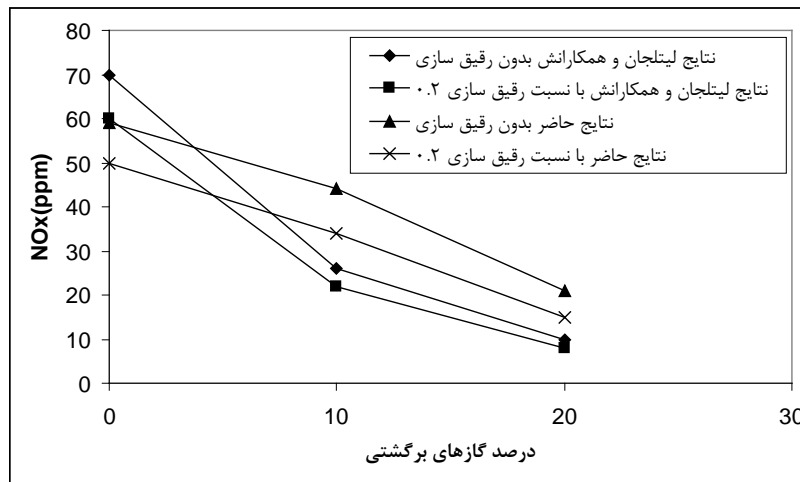
شکل ۱۳- تاثیر برگشت گازهای خروجی و رقیق سازی سوخت ورودی در عدد چرخش ۱,۲ بر انتشار  $NO_x$

در شکل ۱۴ تاثیر بکارگیری روش های نام برده برای کاهش انتشار  $NO_x$  در نسبت هم ارزی ۱ یعنی در نسبتی از سوخت و هوا که احتراق کامل بوده و مقدار  $NO_x$  بیشینه است مورد نظر قرار می گیرد. نتایج حاکی از کاهش انتشار  $NO_x$  با استفاده از تکنیک های فوق بوده و در عدد چرخش ۱,۲ به همراه ۲۰ درصد از گازهای برگشتی و نسبت رقیق سازی ۰,۴ میزان انتشار  $NO_x$  به ۸ppm رسیده است.



شکل ۱۴- تاثیر بهره گیری از ۳ روش کاهش  $NO_x$  به طور همزمان در نسبت هم ارزی ۱

جهت صحه گذاری به نتایج حاصله، در شکل ۱۵ داده های تجربی بدست آمده با داده های آزمایشگاه هایی لیتل جان و همکارانش [15] در دانشگاه برکلی مورد مقایسه قرار گرفته است که روند نتایج مطابقت خوبی را نشان می دهد.



شکل ۱۵- مقایسه نتایج حاضر با داده های لیتلجان و همکارانش در نسبت هم ارزی ۰.۹ و عدد چرخش ۰.۴

## ۵- نتیجه گیری

- با اعمال و افزایش عدد چرخش شعله پهن تر شده و طول آن کوتاهتر می شود که ایجاد FGR داخلی می نماید، همین امر کاهش دما و انتشار  $NO_x$  را در پی دارد.
- با برگشت گازهای خروجی به محفظه احتراق، دمای محفظه احتراق به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط و کاهش غلظت اکسیژن کاهش می یابد. این امر به همراه کاهش زمان ماند سبب کاهش انتشار  $NO_x$  می شود.
- افزایش رقیق ساز  $CO_2$  به سوخت ورودی در کنار برگشت گازهای خروجی و مخلوط چرخشی ورودی کاهش حداکثری انتشار  $NO_x$  را در پی دارد.
- نتایج تجربی نشان داده بود هر کدام از این روش ها به تنهایی قادر به کاهش چشمگیر  $NO_x$  نبوده و یا در صورت تحقق شعله ای ناپایدار ایجاد می کنند در نتیجه از ترکیب سه روش بهره گرفته شد.
- نتایج حاکی از آن است که با برگشت ۲۰ درصد از گازهای خروجی در عدد چرخش ۰.۴ به همراه سوخت رقیق شده با دی اکسید کربن با نسبت رقیق سازی ۰.۴ سطح انتشار  $NO_x$  به 8ppm در نسبت هم ارزی ۱ خواهد رسید.

## تشکر و قدردانی

در پایان لازم است از اعضای محترم انجمن احتراق ایران که طی بازدیدی از آزمایشگاه احتراق دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد ضمن بیان دیدگاه های ارزشمندشان سبب دلگرمی در ادامه کار شدند صمیمانه تشکر نمایم.

## مراجع

- 1- Zink, J., "Ultra Low  $NO_x$  Burners for Industrial Process Heater", 2<sup>nd</sup> International Conference on Combustion Technology for A Clean Environment, Lisbon, 1993.
- 2- G.Liuzzo, N.Verdone and M.Bravi., "The Benefits of flue gas recirculation in waste incineration".waste management, Vol. 27,pp.106-116, 2007.
- 3- M.A. Habib, M. Elshafei, M. Dajani., "Influence of combustion parameters on  $NO_x$  production in an industrial boiler".computers & fluids, Vol. 37, pp.12-23, 2008.
- 4- J.Warnatz., Combustion .springer., 2000.
- 5- Lazic,L., Varga,A., Kizek,J., "An experimental study of the influence of FGR on Nox formation", ,material in technology, Vol. 38, pp. 24-34 2004.

- 6- Weiping Yang, Jian Zhang," *Simulation of methane turbulent swirling flame in the TECFLAM combustor*", Applied Mathematical Modelling, Vol. 33, pp. 2818-2830, 2009.
  - 7- Qing Shang, Jian Zhang," *Simulation of gas-particle turbulent combustion in a pulverized coal-fired swirl combustor*", Fuel, Vol. 88, pp. 31-39, 2009.
  - 8- Beer, J. M. "*Low NO<sub>x</sub> Burners for Boilers, Furnaces and Gas Turbines: Drive towards the Low Bounds of NO<sub>x</sub> Emissions*," Third International Conference on Combustion and Technology for a Clean Environment, Lisbon, pp. IL6, 1995.
  - 9- Syred N., "*A Review of Oscillation Mechanisms and the role of the Precessing Vortex Core (PVC) in Swirl Combustion Systems*", Progress in Energy and Combustion Systems, Vol. 32, no. 2, pp. 93-161, 2006.
  - 10- L. X. ZHOU, X. L. CHEN and J. ZHANG," *STUDIES ON THE EFFECT OF SWIRL ON NO FORMATION IN METHANE/AIR TURBULENT COMBUSTION*", Proceedings of the Combustion Institute, Volume 29, pp, 2235-2242, 2002.
  - 11- Mohamad Shaiful Ashrul Ishak, Mohammad Nazri Mohd. Jaafar, "*THE EFFECT OF SWIRL NUMBER ON REDUCING EMISSIONS FROM LIQUID FUEL BURNER SYSTEM*", Jurnal Mekanikal, June 2005, No. 19, pp. 48 – 56, 2005.
  - 12- Zink, J., "*Ultra Low NO<sub>x</sub> Burners for Industrial Process Heater*", 2<sup>nd</sup> International Conference on Combustion Technology for A Clean Environment, Lisbon, 1993.
  - 13- Ren, J. Y., Qin, W., Eglopoulos, F. N., and Tsotsis, T. T., "*Strain-Rate Effects on Hydrogen-Enhanced Lean Premixed Combustion*", Combustion and Flame, Vol. 124, pp. 717-720, 2001.
  - 14- Rortveit, G. J., Zepter, K, Skreiberg, O., Fossum, M., and Hustad, J. E., "*A Comparison of Low-NO<sub>x</sub> Burners for Combustion of Methane and Hydrogen Mixtures*", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 1123-1129, 2002.
  - 15- Littlejohn, D., Majeski, A. J., Shaheen, T., and Castaldini, C., "*Laboratory Investigation of An Ultralow NO<sub>x</sub> Premixed Combustion Concept For Industrial Boilers*", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 1115-1121, 2002.
  - 16- 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.
  - 17- 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.
  - 18- Schnelle, K.B., Brown, C.A., *Air Pollution Control Technology Handbook*, CRC Press, 2002.
  - 19- Cho, E.S., Chung, S.H., "*characteristics of Nox Emission with flue gas Dilution in air and fuel sides*" KSME International journal, vol.12, pp.2303-2309, 2004.
  - 20- R.Matsumoto, M.Ozawa, S.Terada, T.Lio., "*Low NO<sub>x</sub> Combustion of DME by Means of Flue Gas Recirculation*". Fuel, Vol. 85, pp.112-120, 2006.
  - 21- L.Lazic, A.Varga and J.Kizek., "*an experimental study of the influence of FGR on NO<sub>x</sub> formation*". material in technology, Vol. 38, pp.269-274, 2204.
  - 22- J.K.Kim and Y.Kim., "*NO reduction in a 0.03-0.2 MW oxy-fuel combustor using flue gas recirculation technology*". Combustion institute, Vol. 31, pp.3377-3387, 2007.
- ۲۳- فهیمی راد، ا. و ممهدی هروی، ح.، "تجزیه و تحلیل تئوری و شبیه سازی عددی شعله های پیش آمیخته"، مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک ایران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت، ۱۳۸۹.
- 24- Zhichao Chen, Zhengqi Li , Jianping Jing, Lizhe Chen, Shaohua Wu, Yang Yao," *Gas/particle flow characteristics of two swirl burners*", Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 1180–1191, 2009.
  - 25- Choeng Ryul Choi a, Chang Nyung Kim," *Numerical investigation on the flow, combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler*", Fuel Vol. 88, pp 100-112, 2009.