

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر چرخش هوا بر میزان تشکیل آلاینده NO_x در شعله پخشی پروپان - هوا

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

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

* نویسنده مخاطب: Afshin_fahimi_rad@yahoo.com

چکیده

این مقاله، به منظور درک تاثیر چرخش هوا بر تشکیل آلاینده NO_x در احتراق پروپان - هوا توسط مشعل چرخشی در دو حالت پیش آمیخته و غیر پیش آمیخته صورت گرفته است. آزمایشات در محفظه احتراق استوانه‌ای که تقارن محوری دارد، در نسبت‌های هم ارزی و زوایای چرخش مختلف انجام گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که چرخش باعث افزایش پایداری شعله شده و اختلاط سوخت و هوا را افزایش می‌دهد که این امر باعث کاهش دمای خروجی شده و از آنجاکه تشکیل NO حرارتی متأثر از دما است کاهش NO حرارتی را به همراه دارد. بعلاوه مشاهده می‌شود که چرخش ساختار شعله را تغییر می‌دهد به گونه‌ای که با افزایش عدد چرخش، شعله کوتاه‌تر و پهن‌تر می‌شود. مقادیر بیشینه و کمینه NO_x به ترتیب در هسته مرکزی گرم و نواحی دما پایین یافته رخ می‌دهد.

کلید واژه: چرخش - NO_x - پخشی

۱- مقدمه

احتراق چرخشی بطور وسیعی در محفظه‌های احتراق توربین گاز، مشعل‌های چرخشی و محفظه‌های احتراق چرخشی بکار گرفته شده است [۱ و ۲]. ایده استفاده از چرخش برای افزایش اغتشاش و کاهش تشکیل NO_x برای اولین بار توسط بیر (Beer) پیشنهاد شد [۳]. جریان چرخشی در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است به گونه‌ای که در مطالعات سایر (Syred) [۴] و گوپتا (Gupta) [۵] بطور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. چرخش نه تنها بر مشخصات احتراق اثرگذار می‌باشد، بلکه بر تشکیل آلاینده NO_x نیز تاثیر می‌گذارد [۶]. چرخش راهکاری برای بهبود پایداری شعله می‌باشد و از طرفی باعث افزایش انتقال حرارت شده و بازده احتراق را نیز افزایش می‌دهد [۷ و ۸]. که چند نوع مشعل چرخشی برای رسیدن به این اهداف ساخته شدند [۹]. به منظور کاهش انتشار NO_x ، چرخش نسبت به دیگر راهکارهای احتراقی شبیه مرحله‌ای کردن، برگشت گازهای خروجی (FGR) و بازسوزش سوخت کاملتر است [۱۰]. نتایج بدست آمده از تحقیقات صورت گرفته افزایش تشکیل NO_x را به افزایش عدد چرخش نسبت می‌دهند [۶]، از طرفی نتایجی نیز موجود می‌باشد که کاهش تشکیل NO_x را بدلیل افزایش عدد چرخش گزارش می‌دهند [۱۱]. اندکی تغییر در عدد چرخش بر ناحیه جریان و ساختار شعله مانند محل، سایز، ناحیه برگشت و دمای شعله، چگونگی توزیع غلظت گونه‌ها و همچنین شدت آشفتنی اثر خواهد گذاشت که همه این عوامل در تشکیل آلاینده NO_x موثر بوده اما میزان تاثیر هریک بر تشکیل آلاینده NO_x مشخص نیست [۶]. در تحقیق حاضر به مطالعه آزمایشگاهی تاثیر چرخش بر تشکیل آلاینده NO_x در احتراق چرخشی مغشوش پروپان - هوا پرداخته شده است. معیار

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

چرخش حول محور مرکزی با پارامتر بی بعدی به نام عدد چرخش، (S) ، معرفی می شود. طبق تعریف، عدد چرخش برابر نسبت شار محوری مماسی به شار محوری عمودی و به صورت زیر است [۱۲]:
که در آن R شعاع چرخنده، ρ چگالی، U سرعت محوری و W سرعت مماسی است.

$$S = \int_0^R \rho U W r^2 dr / R_{in} \int_0^R \rho U^2 r dr \quad (1)$$

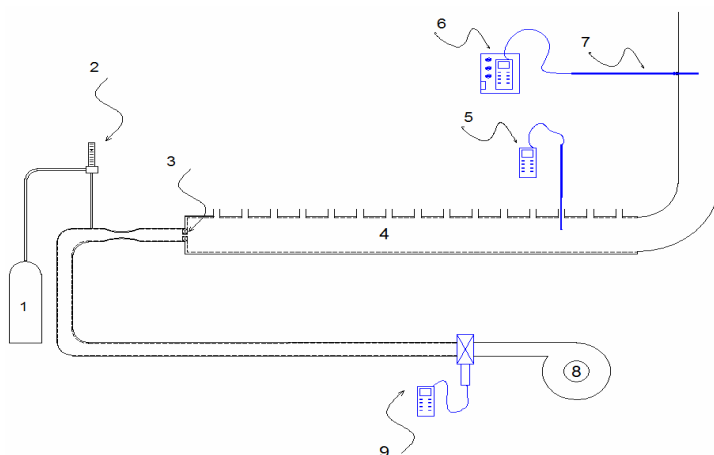
۲- تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایش شامل بدنه اصلی کوره و چرخنده های طراحی شده، سیستم تامین کننده سوخت و هوا و بالاخره وسایل اندازه گیری می باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است. بدنه اصلی کوره یک محفظه احتراق استوانه ای به طول ۱۰۰۰ mm و قطر داخلی ۱۰۰ mm می باشد که از فولاد توخالی ساخته شده است و به ضخامت ۱۵ mm عایق کاری شده است. در محفظه احتراق مخلوط سوخت و هوا در حالت پیش آمیخته، از طریق لوله مرکزی ورودی به قطر ۳۵ mm تامین شده و در حالت غیر پیش آمیخته، سوخت از طریق نازل ۵ mm و هوا از قسمت چرخشی چرخنده تامین شده است. چرخنده ها با زاویه های تیغه مختلف برای دستیابی به اعداد چرخش مختلف نصب شده است. مقدار غلظت NO_x به وسیله دستگاه آنالیز گاز Testo 350 XL اندازه گیری شده است. برای اندازه گیری دبی هوا از فلومتر Lutron YK-2005AM استفاده شده است که شامل ترموکوپل نوع K جهت اندازه گیری دما است. برای اندازه گیری دبی سوخت نیز از روماتر SWP F-06A استفاده شده است. عدد چرخش توسط رابطه زیر تعریف می شود [۱۳]:

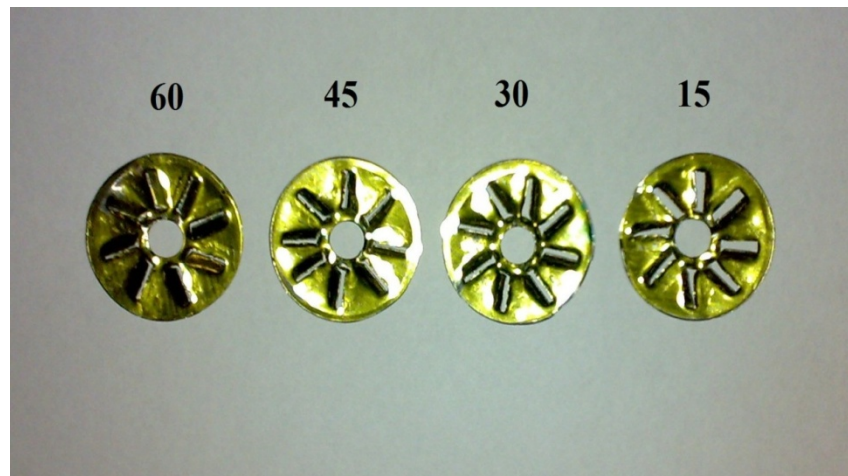
θ زاویه پره و σ_r نسبت قطر داخلی به قطر خارجی چرخنده است.

زوایای پره های مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه که در شکل (۲) نشان داده شده است. قطر داخلی تمامی چرخنده ها ۸ میلیمتر و قطر خارجی آنها ۳۵ میلیمتر است. بنابراین طبق تعریف، اعداد چرخش به ترتیب ۰، ۰.۲، ۰.۴، ۰.۷ و ۱.۲ است. شایان ذکر است آزمایشات در نسبت های هم ارزی مختلف صورت گرفته است.

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



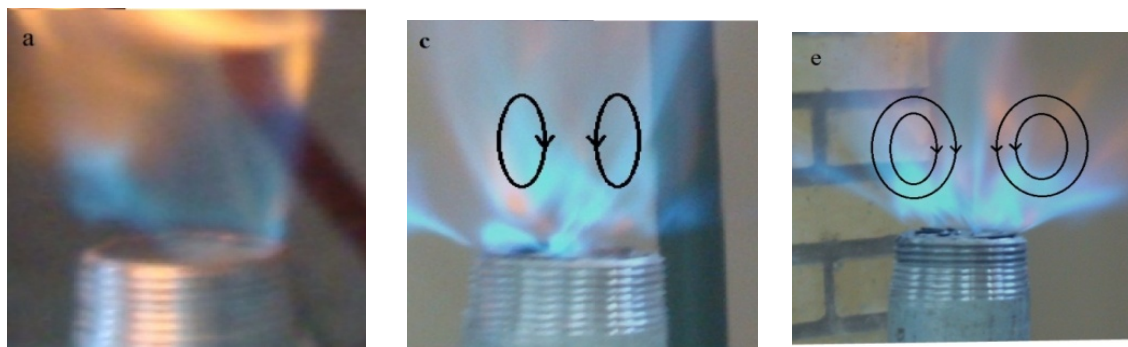
شکل ۱- قسمت آزمایش. ۱، پروپان؛ ۲، روماتر؛ ۳، چرخنده؛ ۴، کوره؛ ۵، ترموکوپل؛ ۶، آنالیزور گاز؛ ۷، میله اندازه گیری؛ ۸، فن هوا، ۹، فلومتر



شکل ۲- چرخنده‌ها با زوایای چرخش مختلف

۴- نتایج و بحث

در شکل (۳)، تصاویر شعله در هوای آزاد، در اعداد چرخش مختلف و در نسبت هم ارزی ۱ و در حالت پیش آمیخته نشان داده شده است. با توجه به تصاویر مشاهده می‌شود که با افزایش عدد چرخش شعله پهن‌تر شده و طول آن کمتر می‌شود که این شرایط با اندکی اختلاف در داخل محفظه احتراق نیز وجود دارد و سبب می‌شود حالت گریز از مرکز در نواحی پایین دست تا بالادست شعله ایجاد شود. این حالت شعله باعث شده که بازگشت جریان ایجاد شود. سراسر ساختار ناحیه جریان گاز اساساً می‌تواند به سه قسمت تقسیم شود: یک ناحیه برگشت مارپیچی مرکزی (CTRZ)^۱، که به خاطر گرادیان فشار مخالف القا شده به وسیله چرخش ایجاد شده است، ناحیه برگشت گوشه (CRZ)^۲، به سبب انبساط شعاعی جریان و دیواره ایجاد می‌شود و لایه های برشی دوتایی (لایه های داخلی CTRZ و لایه های بیرونی اطراف CTZ). هردو نواحی برگشتی به بر روی گونه ها و پایداری شعله در پایین دست شعله تاثیر می گذارند. CTRZ در تصاویر نشان داده از شعله به شکل بیضی نشان داده شده است. البته چون تصاویر خارج از کوره گرفته شد، بالتبع امکان نشان دادن نواحی دیگر وجود ندارد.

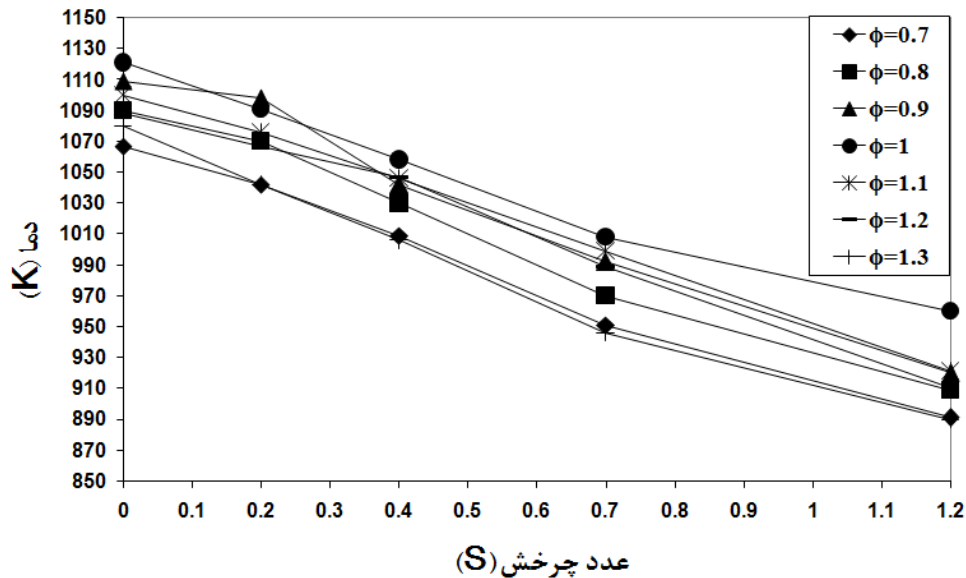


شکل - تصاویر شعله در نسبت هم ارزی ۱ و عددهای چرخش مختلف. 1.2: e :0.4:c :0.2:b :0.0:a

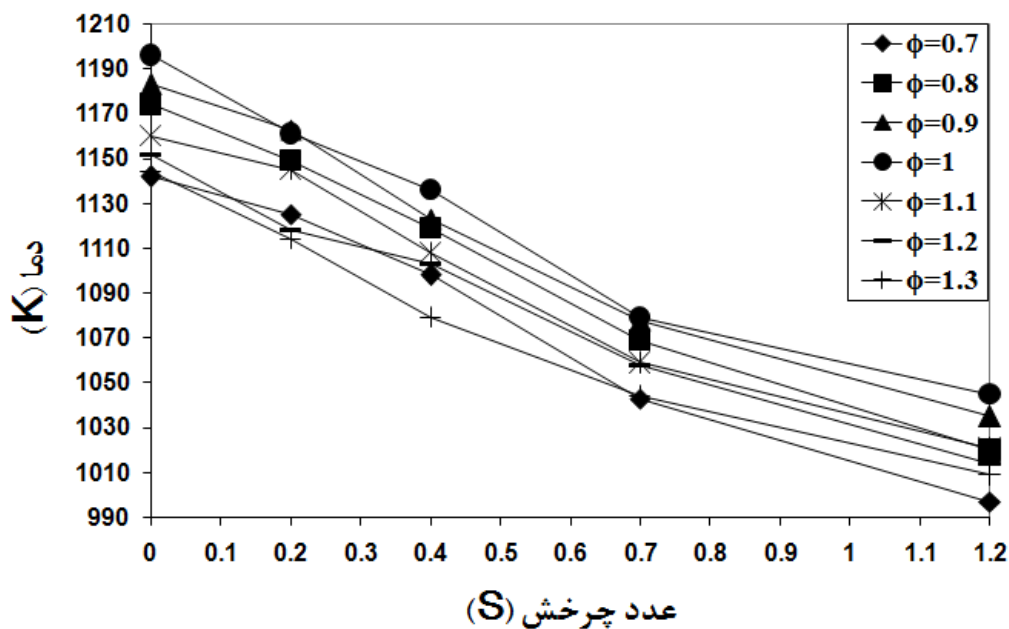
¹ Center toroidal recirculation zone

² Corner recirculation zone

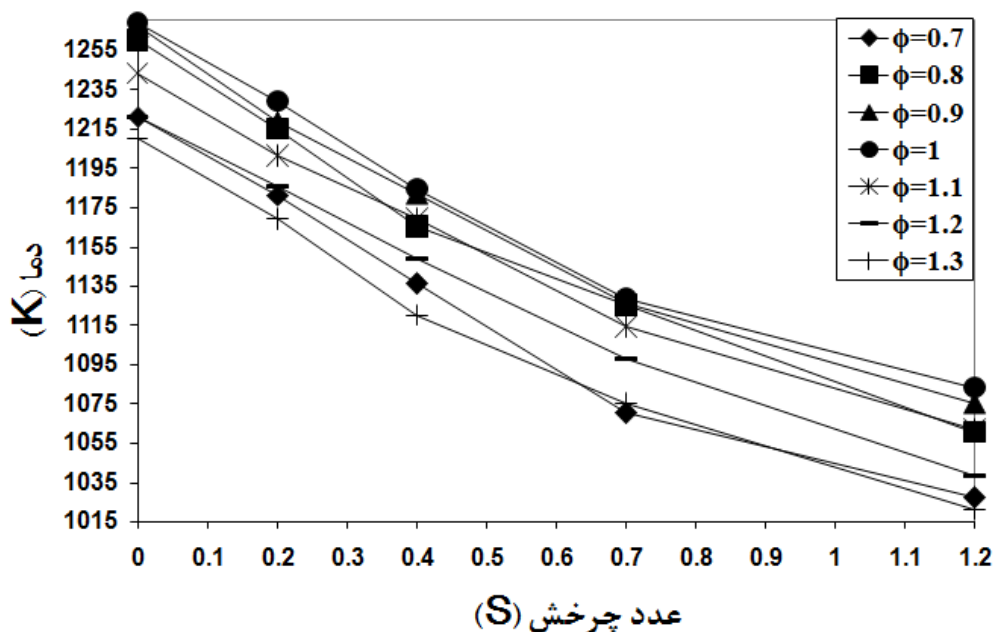
در شکل‌های (۴) تا (۶) نتایج آزمایشگاهی تغییرات دما در انتهای کوره برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف و در حالت پیش‌آمیخته نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد چرخش دما در تمامی نواحی کاهش پیدا کرده و به کمترین مقدار در انتهای کوره رسیده است. این کاهش دما به علت پایین آمدن ماکزیمم دمای شعله و کشیده شدن شعله به سمت ورودی کوره است که تمامی این تغییرات بر روی میزان تشکیل NO_x تاثیر گذاشته است.



شکل ۴- تغییرات دما در فاصله ۹۰۰ میلیمتری از ابتدای کوره در مرکز کوره

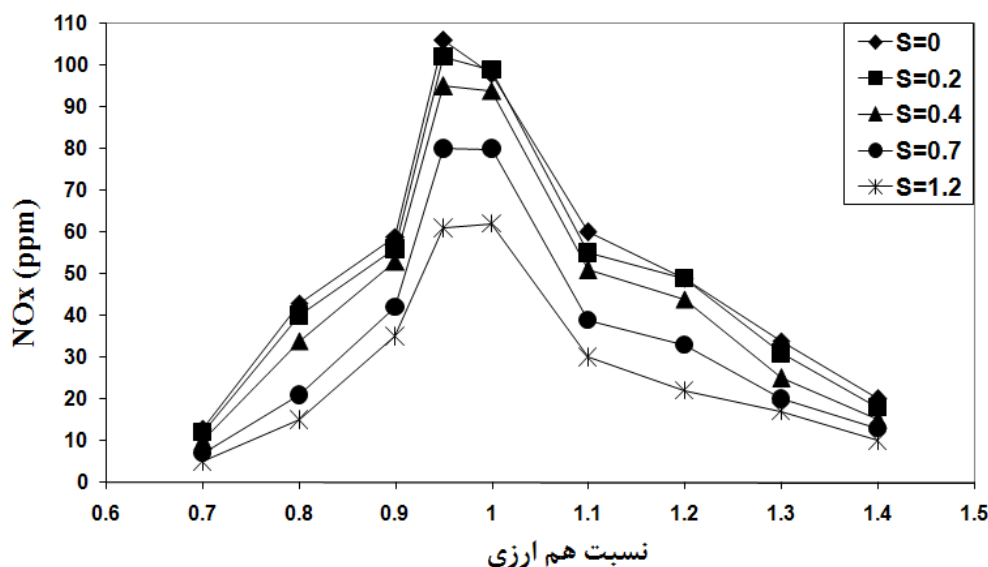


شکل ۵- تغییرات دما در فاصله ۷۵۰ میلیمتری از ابتدای کوره در مرکز کوره



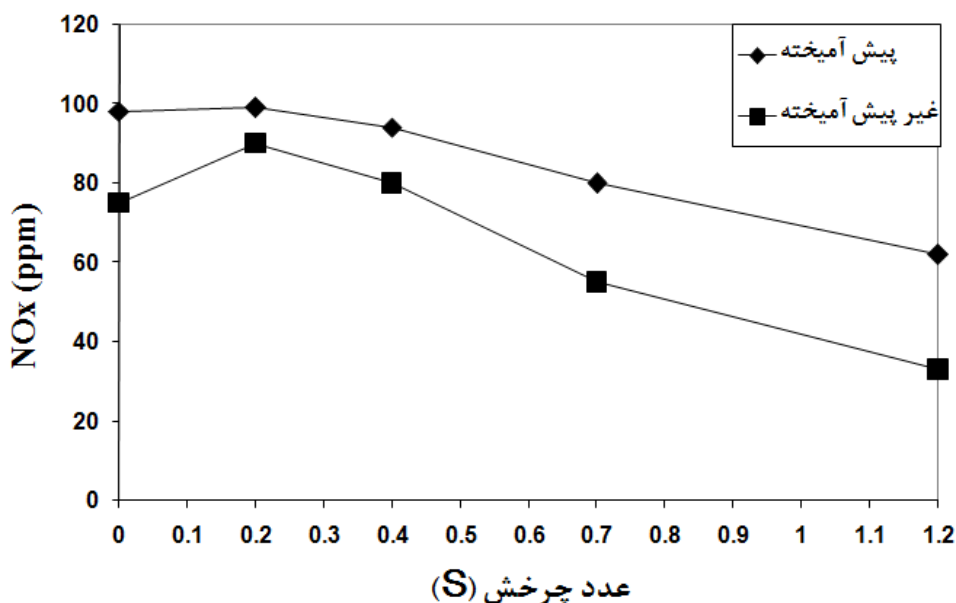
شکل ۶- تغییرات دما در فاصله ۶۰۰ میلیمتری از ابتدای کوره در مرکز کوره

در شکل (۷)، نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده NO_x در تمام نسبت‌های هم ارزی برای اعداد چرخش مختلف در حالت پیش آمیخته نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت هم ارزی در تمام اعداد چرخش بجز عدد چرخش ۱.۲، ماکزیمم مقدار NO_x در نسبت هم ارزی ۰.۹۵ اتفاق می‌افتد و در عدد چرخش ۰ و نسبت هم ارزی ۰.۹۵ به بیشترین مقدار خود (۱۰۶ ppm) رسیده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد چرخش در تمامی نسبت‌های هم ارزی، در تشکیل NO_x ابتدا کاهش جزئی و سپس با افزایش در اعداد چرخش ۰.۷ و ۱.۲ کاهش شدیدی رخ داده است. 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 می‌شود 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 گونه‌های 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 می‌شود. در مجموع در چرخش بالا بازگشت گازهای خروجی در ناحیه نزدیک شعله ایجاد شده است. البته این پدیده در محفظه‌های احتراق مختلف، متفاوت است به گونه‌ای که قطر محفظه احتراق برای این موضوع بسیار موثر است. بطور کلی نتایج نشان می‌دهد که به ترتیب در نسبت‌های هم ارزی مختلف ۰.۷، ۰.۸، ۰.۹۵، ۱.۱ و ۱.۴ از عدد چرخش ۰ تا ۱.۲، NO_x به میزان ۶۱.۵٪، ۶۵.۱٪، ۴۲.۴٪، ۵۰٪ و ۵۰٪ کاهش یافته است.



شکل ۷- نتایج اندازه گیری شده NO_x در نسبت‌های هم ارزی مختلف

در شکل (۸) مقایسه بین نتایج اندازه گیری شده NO_x در حالت پیش آمیخته و غیر پیش آمیخته در نسبت هم ارزی ۱ و برای تمام اعداد چرخش مشاهده می‌شود. نتایج نشان داده که در حالت غیر پیش آمیخته ابتدا در عدد چرخش ۰.۲، یک افزایش اندک در NO_x دیده شده است. این افزایش به علت افزایش در دمای خروجی در این عدد چرخش می‌باشد. اما در اعداد چرخش بالاتر NO_x به شدت کاهش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در حالت غیر پیش آمیخته چرخش راهکار مناسبتری در کاهش NO_x است به گونه‌ای که چون در حالت پیش آمیخته NO_x از عدد چرخش ۰ تا ۱.۲ به اندازه ۳۶٪ کاهش پیدا کرده اما در حالت غیر پیش آمیخته شاهد کاهش ۵۶ درصدی NO_x خواهیم بود.



شکل ۸- مقایسه نتایج اندازه گیری شده NO_x در نسبت هم ارزی ۱ برای حالت‌های پیش آمیخته و غیر پیش آمیخته

۵- انواع خطاها و میزان آنها در داده‌های آزمایشگاهی

صرفنظر از دقت آزمایش به دلایل مختلف ممکن است در جمع‌آوری داده‌های تجربی خطا وجود داشته باشد. بعضی از این خطاها از نوع تصادفی هستند و بعضی به خاطر اشتباه در حین آزمایش است. داده‌های غلط حاصل از اشتباه‌های واضح بلافاصله قابل شناسایی بوده و کنار گذاشته شده‌اند. ولی در مورد داده‌هایی که مشکوک هستند به سادگی نمی‌توان تشخیص داد. بنابراین جهت تشخیص این خطاها از تحلیل عدم قطعیت داده‌های تجربی که به روش آماری انجام شده است، استفاده گردیده 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 است و سپس میانگین حسابی داده‌ها محاسبه و به عنوان داده نهایی آزمایشگاهی استفاده می‌شود. مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده‌ها از فرمول زیر محاسبه شده است.

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{n^{0.5}} \quad (5)$$

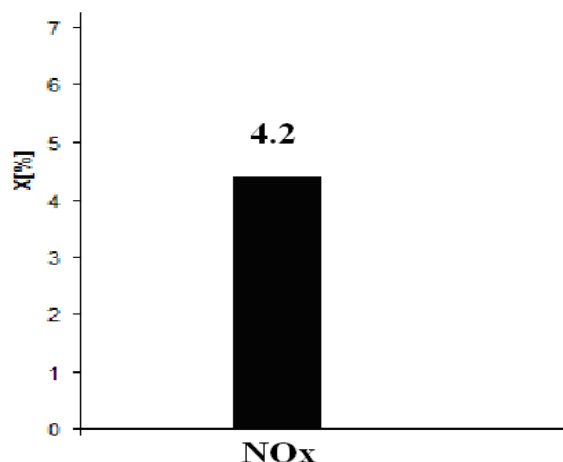
در این فرمول σ_m انحراف معیار مقدار میانگین و σ انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها و n تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه می‌باشد. با توجه به اینکه برای کلیه نتایج تجربی که برای تاثیر چرخش انجام شده است، $n=4$ می‌باشد. فرمول فوق به شکل زیر در تحلیل نتایج تجربی استفاده شده است.

$$\sigma_m = 0.5\sigma \quad (6)$$

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

$$X \% = \frac{\sigma_m}{\bar{x}} \times 100 \quad (7)$$

که در آن $\bar{x}$ مقدار میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در شکل (۹) مقادیر عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی را برای عدد چرخش ۰.۲ و در نسبت هم ارزی ۱ در خروجی کوره نشان داده شده است.



شکل ۹- مقادیر عدم قطعیت برای آلاینده NOx در خروجی برای عدد چرخش ۰.۲

۵- نتیجه گیری کلی

نتایج آزمایشگاهی تاثیر چرخش هوا بر میزان تشکیل NO_x برای حالت پیش آمیخته و غیر پیش آمیخته مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر می باشد:

- با افزایش عدد چرخش، شعله پهن تر شده و طول آن کوتاهتر شده است.
- با افزایش عدد چرخش، دما در تمامی نواحی کاهش پیدا می کند و به کمترین مقدار در انتهای کوره رسیده است.
- با افزایش عدد چرخش، در تمام نسبت هم ارزی ها NO_x ابتدا کاهش جزئی و سپس با افزایش در اعداد چرخش ۰.۷ و ۱.۲ کاهش شدیدی اتفاق افتاده است.
- راهکار چرخش در حالت غیر پیش آمیخته نسبت به حالت پیش آمیخته در کاهش NO_x مؤثرتر است.

مراجع

1. Weiping, Yang, Jian, Zhang, "Simulation of methane turbulent swirling flame in the TECFLAM combustor". Applied Mathematical Modeling, Vol. 33, pp. 2818-2830, 2009.
2. Qing, Shang, Jian, Zhang, "Simulation of gas-particle turbulent combustion in a pulverized coal-fired swirl combustor". Fuel, Vol. 88, pp. 31-39, 2009.
3. Beer, J. M., "Low NO_x Burners for Boilers, Furnaces and Gas Turbines: Drive towards the Low Bounds of NO_x Emissions". Third International Conference on Combustion and Technology for a Clean Environment, Lisbon, paper IL6, 1995.
4. 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.
5. Gupta, A. K., Lilley, D. J., Syred, N., "Swirl Flows, Abacus Press, Tunbridge Wells", United Kingdom, 1984.
6. Zhou, L. X., Chen, X. L., and Zhang, J., "Studies on the effect of swirl on NO formation in methane/air turbulent combustion", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 2235-2242, 2002.
7. 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.
8. Choeng, Ryul, Choi, a., Chang, Nyung, Kim., "Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler", Fuel, Vol. 88, 2009.
9. Kurose, R., Ikeda, M., Makino, H., Kimoto, M., Miyazaki, T., "Pulverized Coal combustion characteristics of high-fuel-ratio coals". Fuel, Vol. 83, pp. 1777-1785, 2004.
10. Lei, Peng, Jian, Zhang, "Simulation of turbulent combustion and NO formation in a swirl combustor", Chemical Engineering Science, Vol. 160, pp. 2903 - 2914, 2009.
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, Vol. 19, pp. 48 - 56, 2005.
12. Khelil, A., Naji, H., Loukarfi, L., Mompean, G., "Prediction of a high swirled natural gas diffusion flame using a PDF model". Fuel, Vol. 88, pp. 374-381, 2009.
13. Ji, Hyun, Kwark, Yong, Ki, Jeong, Chung, Hwan, Jeon, and Young, June, Chang, 2004. "Effect of Swirl Intensity on the Flow and Combustion of a Turbulent Non-Premixed Flat Flame", Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 73, pp. 231-257.