

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر چرخش هوا بر میزان تولید NO<sub>x</sub> در شعله پیش‌آمیخته پروپان - هوا

پیمان بازیار<sup>۱</sup>، افشین فهیمی‌راد<sup>۲</sup> و علیرضا حاجی‌پور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه علمی کاربردی فذا، آمل، ایران، peyman.baziar@yahoo.com

<sup>۲</sup>مرکز تحقیق و توسعه شرکت دیزل سنگین ایران (دسا)، آمل، ایران، a.fahimirad@desa.ir

<sup>۳</sup>باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات آیت‌الله آملی، آمل، ایران،

alirezahajipour@gmail.com

چکیده - در این مقاله، برای درک تأثیر چرخش هوا بر روی تشکیل NO<sub>x</sub>، احتراق پیش‌آمیخته پروپان - هوا، با مشعل چرخشی به وسیله آزمایشات انجام شده است. آزمایشات در محفظه احتراق استوانه‌ای طراحی شده، که تقارن محوری دارد، در نسبت‌های هم‌ارزی و زوایای چرخش مختلف انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که چرخش باعث افزایش پایداری شعله شده و اختلاط سوخت و هوا را افزایش می‌دهد و همچنین در مشعل چرخشی با افزایش عدد چرخش، شعله کوتاهتر و پهن‌تر شده و دما در خروج و در نتیجه NO<sub>x</sub> حرارتی شدت کاهش پیدا کرده است. NO<sub>x</sub> حرارتی به شدت از دما تأثیر پذیرفته است. مقادیر زیاد و کم NO<sub>x</sub> به ترتیب در هسته مرکزی گرم و نواحی دما پایین یافته می‌شود. چرخش ایجاد یک نوع بازگشت گازهای خروجی (FGR) داخلی در نزدیکی شعله کرده است. کلیدواژه - چرخش، NO<sub>x</sub>، پیش‌آمیخته.

دیگر محققین کاهش در تشکیل NO<sub>x</sub> را با افزایش در عدد چرخش گزارش می‌دهند [۱۱]. تأثیر عدد چرخش بر روی NO<sub>x</sub> یک پدیده مرکب است. تغییر عدد چرخش بر ناحیه جریان شامل محل، اندازه، ناحیه برگشت و دمای شعله، توزیع غلظت گونه‌ها و شدت آشفتنگی اثر خواهد گذاشت. همه این‌ها در تشکیل NO<sub>x</sub> مؤثر است، اما مشخص نیست که کدام تأثیر بیشتری بر روی تشکیل NO<sub>x</sub> دارد [6]. در این مقاله ما مطالعه آزمایشگاهی تأثیر چرخش را بر روی تشکیل NO<sub>x</sub> در احتراق چرخشی مغشوش پروپان - هوا انجام دادیم. معیار چرخش حول محور مرکزی با پارامتر بی‌بعدی به نام عدد چرخش (S) معرفی می‌شود. عدد چرخش برابر است با نسبت شار محوری مماسی به شار محوری عمودی و به صورت زیر است که در آن شعاع چرخنده است. [۱۲]:

$$S = \int_0^R \rho U W r^2 dr / R_m \int_0^R \rho U^2 r dr \quad (1)$$

### ۲- مقدمات آزمایش

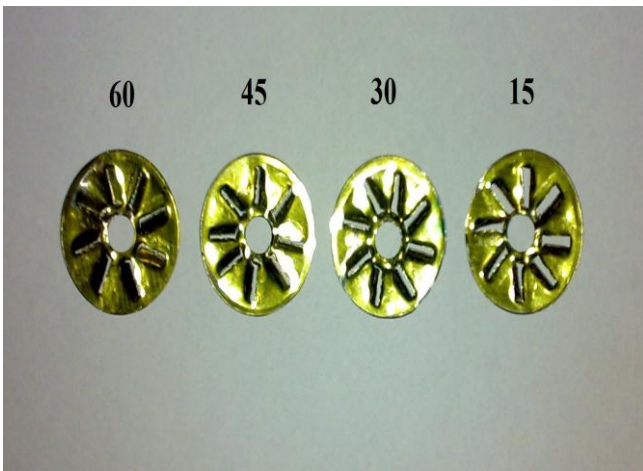
مقدمات آزمایش شامل قسمت تست، سیستم تأمین‌کننده سوخت و هوا و سیستم‌های اندازه‌گیری که در شکل ۱ و ۲

### ۱- مقدمه

احتراق چرخشی به گستردگی در محفظه‌های احتراق توربین گاز، مشعل‌های چرخشی و محفظه‌های احتراق چرخشی بکار گرفته شده است [۱ و ۲]. ایده استفاده از چرخش برای کم کردن اغتشاش و کاهش تشکیل NO<sub>x</sub> به وسیله بیر (Beer) پیشنهاد داده شد [۳] جریان چرخشی در ۲ دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است که تقریباً بطور کامل در مطالعه علمی سایرد (Syred) [۴] و گوپتا (Gupta) تشریح شده است [۵]. چرخش نه تنها می‌تواند بر مشخصات احتراق اثر بگذارد، بلکه بر تشکیل NO<sub>x</sub> نیز تأثیر می‌گذارد [۶]. چرخش ابزاری برای پایدار کردن شعله و بالا بردن و کنترل انتقال حرارت است و بازده احتراق را افزایش می‌دهد [۷ و ۸] که برای رسیدن به این نیازمندی‌ها، چند نوع مشعل چرخشی ساخته شدند که جریان ذرات چرخشی پیچیده برای رسیدن به این موضوع بکار گرفته شده است [۹]. برای رسیدن به انتشار NO<sub>x</sub> کم، چرخش از دیگر تکنیک‌های احتراق شبیه مرحله‌ای کردن، FGR و دوباره سوختن کامل‌تر است [۱۰]. بعضی محققین افزایش در تشکیل NO<sub>x</sub> را با افزایش در عدد چرخش گزارش می‌دهند [۶].



شکل ۲: قسمت آزمایش



شکل ۳: چرخنده‌ها

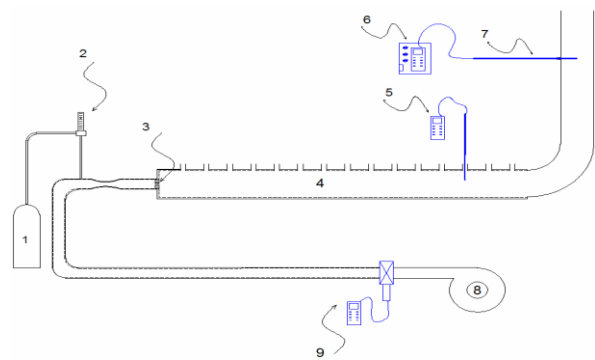
## ۳- نتایج و بحث

در شکل ۴، تصاویر شعله را در هوای آزاد و به ترتیب در اعداد چرخش مختلف و در نسبت هم‌ارزی ۱ نشان داده شده است. با توجه به تصاویر می‌بینیم 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، که سبب می‌شود حالت گریز از مرکز در نواحی پایین دست تا بالا دست 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)، که به خاطر

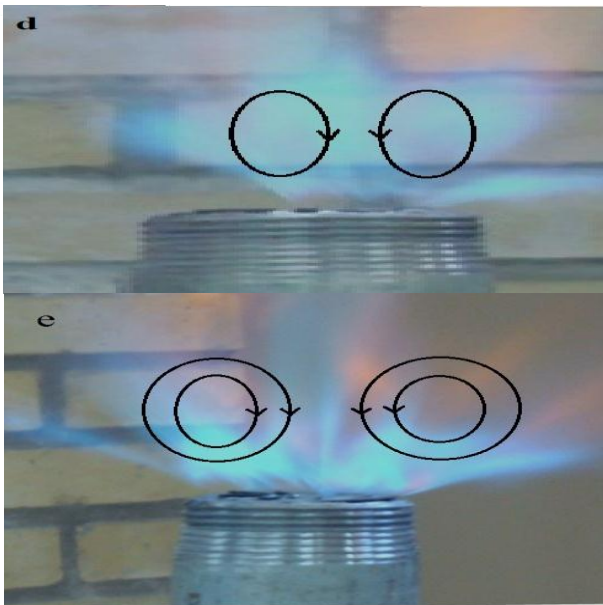
نشان داده شده را شامل می‌شود. قسمت تست، یک محفظه احتراق است که از فولاد تو خالی ساخته شده و دارای طول 1000 mm و قطر داخلی 105 mm است که با عایقی به ضخامت 15 mm پوشانده شده است. برای دیدن شعله بر روی چند دریچه اول شیشه کوارتز (Quartz) نصب شده است که به صورت کشویی داخل و خارج می‌آید. در محفظه احتراق مخلوط سوخت و هوا از طریق لوله مرکزی ورودی به قطر 35 mm تأمین شده است. که چرخنده‌های با زاویه تیغه مختلف برای دستیابی به جریان‌های چرخشی با اعداد چرخش مختلف نصب شده است. مقدار غلظت NO به وسیله گاز آنالیزور Testo 350 اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری دبی جرمی هوا از فلومتر Lutron YK-2005AM استفاده شده است که شامل ترموکوپل K-type برای اندازه‌گیری دما است. برای اندازه‌گیری دبی جرمی سوخت از روتامتر SWP F-06A استفاده شده است. آزمایشات در آزمایشگاه دانشگاه آزاد اسلامی مشهد انجام شده است. عدد چرخش معرفی می‌شود با [۱۳]:

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

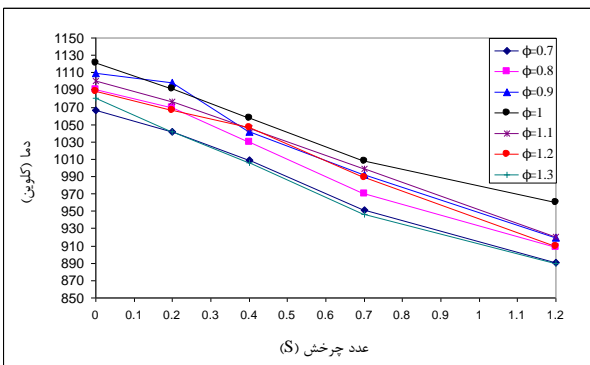
که  $\theta$  زاویه پره و  $\sigma_r$  نسبت قطر داخلی به قطر خارجی چرخنده است. زوایای پره استفاده شده در این تحقیق ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه است که چرخنده‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. قطر داخلی چرخنده ۸ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۳۵ میلی‌متر است. بنابراین اعداد چرخش به ترتیب ۰، ۰.۲، ۰.۴، ۰.۷ و ۱.۲ است. همچنین آزمایشات در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف ( $\Phi$ ) انجام شده است.



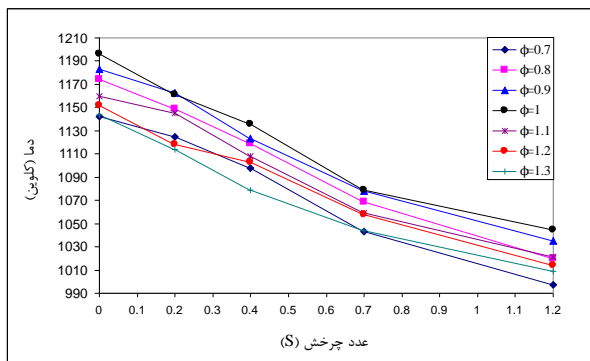
شکل ۱: قسمت آزمایش. (۱) پروپان، (۲) روتامتر، (۳) چرخنده، (۴) کوره، (۵) ترموکوپل، (۶) آنالیزور گاز، (۷) میله اندازه‌گیری، (۸) فن هوا، (۹) فلومتر



شکل ۴: تصویر شعله در نسبت هم‌ارزی ۱ و عددهای چرخش مختلف. a, ۰.۲, b, ۰.۲, c, ۰.۴, d, ۰.۷, c, ۱.۲



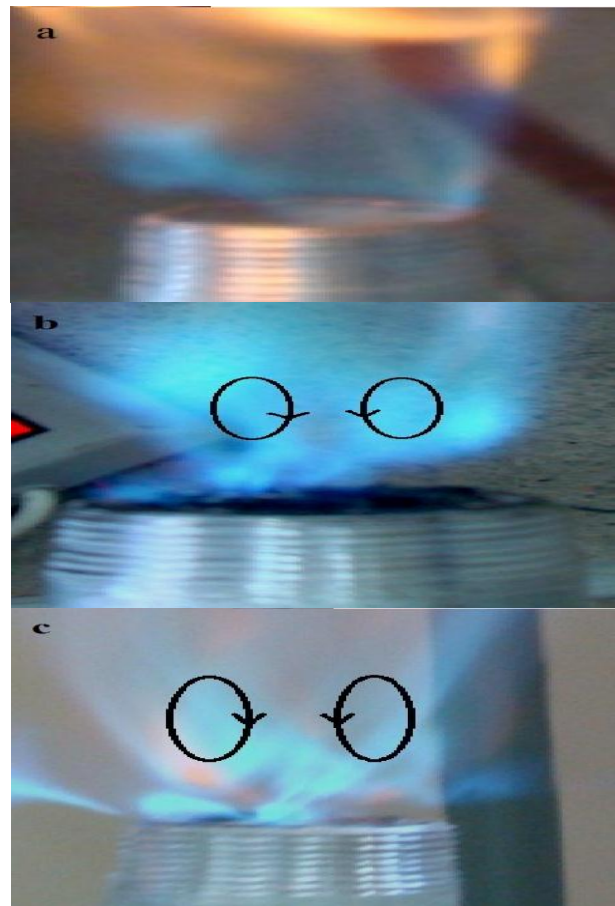
شکل ۵: تغییرات دما در فاصله ۹۰۰ میلیمتری از ابتدای کوره در مرکز کوره



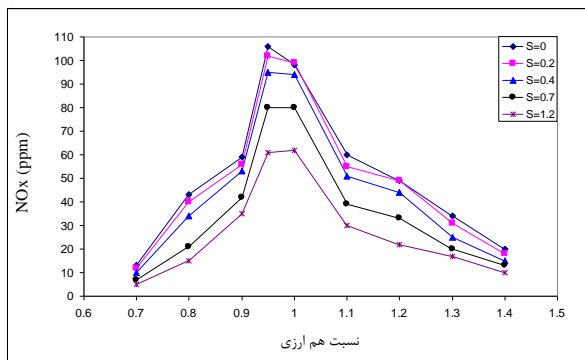
شکل ۶: تغییرات دما در فاصله ۷۵۰ میلیمتری از ابتدای کوره در مرکز کوره

گردایان فشار مخالف القاشده به وسیله چرخش ایجاد می‌شود، ناحیه برگشت گوشه (CRZ)، به سبب انبساط شعاعی جریان و دیواره ایجاد می‌شود و لایه‌های برشی دوتایی (لایه‌های داخلی CTRZ و لایه‌های بیرونی اطراف CTZ). هردو نواحی برگشتی به بر روی گونه‌ها و پایداری شعله در پایین دست شعله تأثیر می‌گذارند. CTRZ در تصاویر نشان داده از شعله به شکل بیضی نشان داده شده است. البته چون تصاویر خارج از کوره گرفته شد، امکان نشان دادن نواحی دیگر نبوده است.

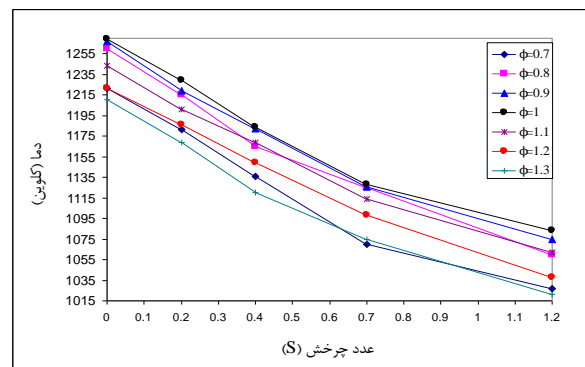
در شکل‌های ۵ تا ۷ نتایج آزمایشگاهی تغییرات دما در انتهای کوره برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد چرخش دما در تمامی نواحی کاهش پیدا کرده و به کمترین مقدار در انتهای کوره رسیده است. این کاهش دما به علت کاهش پیدا کردن بیشینه دمای شعله و کشیده شدن شعله به سمت ورودی کوره است. که تمام این تغییرات بر روی میزان تشکیل  $NO_x$  اثر گذاشته است.







شکل ۸: نتایج اندازه‌گیری شده NO<sub>x</sub> در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف



شکل ۷: تغییرات دما در فاصله ۶۰۰ میلیمتری از ابتدای کوره در مرکز کوره

#### ۴- انواع خطاها و میزان آنها در داده‌های اندازه‌گیری

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 کالیبره‌نمودن 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 نهائی آزمایشگاهی استفاده می‌شود. مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده‌ها از فرمول زیر محاسبه شده است.

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

در این فرمول  $\sigma_m$  انحراف معیار مقدار میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها و  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه می‌باشد. با توجه به اینکه برای کلیه نتایج تجربی که برای تاثیر

در شکل ۸، نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده NO<sub>x</sub> در تمام نسبت‌های هم‌ارزی برای اعداد چرخش مختلف نشان داده شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت هم‌ارزی در تمام اعداد چرخش به جز عدد چرخش ۱.۲، بیشینه مقدار NO<sub>x</sub> در نسبت هم‌ارزی ۰.۹۵ اتفاق می‌افتد و در عدد چرخش صفر و نسبت هم‌ارزی ۰.۹۵ به بیشترین مقدار خود (۱۰۶ ppm) رسیده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد چرخش در تمام نسبت‌های هم‌ارزی، NO<sub>x</sub> ابتدا کاهش کم و سپس با افزایش در اعداد چرخش ۰.۷ و ۱.۲ کاهش شدیدی اتفاق افتاده است. علت کاهش شدید NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> در عدد چرخش بالا می‌شود. در کل در چرخش بالا بازگشت گازهای خروجی در ناحیه نزدیک شعله ایجاد شده است. البته این پدیده در محفظه‌های احتراق مختلف، متفاوت است. قطر محفظه احتراق برای این موضوع بسیار موثر است. در کل نتایج نشان می‌دهد که به ترتیب در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف ۰.۷، ۰.۸، ۰.۹۵، ۱.۱ و ۱.۴ از عدد چرخش ۰ تا ۱.۲، NO<sub>x</sub> به اندازه ۶۱.۵٪، ۶۵.۱٪، ۴۲.۴٪، ۵۰٪ و ۵۰٪ کاهش یافته است.

با افزایش عدد چرخش، در تمام نسبت هم‌ارزی‌ها  $NO_x$  ابتدا کاهش کم و سپس با افزایش در اعداد چرخش ۰.۷ و ۱.۲ کاهش شدیدی اتفاق افتاده است.

## مراجع

- [1] W. Yang and J. Zhang, "Simulation of methane turbulent swirling flame in the TECLAM combustor," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, pp. 2818-2830, 2009.
- [2] Q. Shang and J. Zhang, "Simulation of gas-particle turbulent combustion in a pulverized coal-fired swirl combustor," *Fuel*, Vol. 88, pp. 31-39, 2009.
- [3] J.M. Beer, "Low  $NO_x$  Burners for Boilers, Furnaces and Gas Turbines: Drive towards the Low Bounds of  $NO_x$  Emissions," paper IL6, *Third International Conference on Combustion and Technology for a Clean Environment*, Lisbon, 1995.
- [4] N. Syred, "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] A.K. Gupta, D.J. Lilley and N. Syred, "Swirl Flows, Abacus Press, Tunbridge Wells," United Kingdom., 1984.
- [6] 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*, 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* 50, pp. 1180-1191, 2009.
- [8] C.R. Choi, C.N. 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] R. Kurose, M. Ikeda, H. Makino, M. Kimoto and T. Miyazaki, "Pulverized Coal combustion characteristics of high-fuel-ratio coals," *Fuel*, Vol. 83, pp. 1777-1785, 2004.
- [10] L. Peng and J. Zhang, "Simulation of turbulent combustion and  $NO$  formation in a swirl combustor," *Chemical Engineering Science*, Vol. 160, pp. 2903 - 2914, 2009.
- [11] M.S. Ashrul Ishak, M. 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] A. Khelil, H. Naji, L. Loukarfi and G. Mompean, "Prediction of a high swirled natural gas diffusion flame using a PDF model," *Fuel*, Vol. 88, pp. 374-381, 2009.
- [13] J. KWARK, Y. JEONG, C. JEON, and Y. CHANG, "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, 2004.

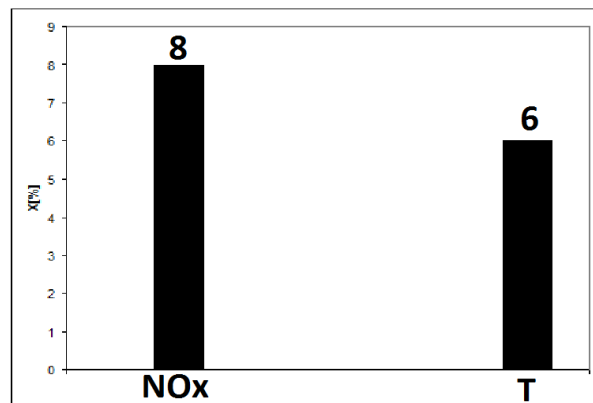
چرخش انجام شده است،  $n = 4$  می‌باشد. فرمول فوق به شکل زیر در تحلیل نتایج تجربی استفاده شده است.

$$\sigma_m = 0.5\sigma \quad (4)$$

مقدار درصد عدم قطعیت ( $x$ ) داده‌های آزمایشگاهی از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$X \% = \frac{\sigma_m}{\bar{x}} \times 100 \quad (5)$$

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 هم‌ارزی ۱ در خروجی کوره نشان داده شده است.



شکل ۹: مقادیر عدم قطعیت برای آلاینده  $NO_x$  در خروجی و دما در فاصله 900 mm از ابتدای محفظه احتراق برای عدد چرخش ۰.۲

## ۵- نتیجه‌گیری کلی

- نتایج آزمایشگاهی تأثیر چرخش هوا بر میزان تشکیل  $NO_x$  برای حالت پیش‌آمیخته مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر می‌باشد.
- با افزایش عدد چرخش شعله پهن‌تر شده و طول آن کوتاهتر شده است.
  - با اعمال چرخش ناحیه جریان به سه ناحیه: ناحیه برگشت ماریچی مرکزی (CTRZ)، ناحیه برگشت گوشه (CRZ)، و لایه‌های برشی دوتایی (لایه‌های داخلی CTRZ و لایه‌های بیرونی اطراف CTZ) تقسیم شده است.
  - با افزایش عدد چرخش، دما در تمامی نواحی کاهش پیدا می‌کند و به کمترین مقدار در انتهای کوره رسیده است.