



مطالعه عددی تاثیر چرخش هوا بر روی اغتشاش و تشکیل NO_x در احتراق متان - هوا

پیمان بازیار - کارشناس ارشد مکانیک (تبدیل انرژی) و مدرس دانشگاه جامع علمی کاربردی آمل (فذا)
افشین فهیمی راد - کارشناس ارشد مکانیک (تبدیل انرژی) و مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری

E-mail: Peyman.Baziar@yahoo.com

چکیده: یکی از روش های کاهش اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، افزایش اغتشاش است. در این مقاله برای درک تاثیر چرخش هوا بر روی شدت اغتشاش و تشکیل NO_x ، احتراق مغشوش و غیر پیش آمیخته متان - هوا به وسیله شبیه سازی انجام شده است. شبیه سازی برای محفظه احتراق استوانه ای، که تقارن محوری دارد، در نسبت های هم ارزی و زوایای مختلف چرخش انجام گرفته است. مدل PDF برای شبیه سازی احتراق بکار برده شده است. شبیه سازی مقدار NO_x با پیش پردازنده NO_x و شبیه سازی اغتشاش با مدل k- ϵ از نرم افزار FLUENT انجام شده است. نتایج شبیه سازی شده با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققین مقایسه شده و مطابقت خوبی را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد چرخش، شدت اغتشاش ابتدا کاهش کم و سپس افزایش شدیدی پیدا می کند. همچنین با افزایش اغتشاش، دما و NO_x در خروجی محفظه احتراق کاهش پیدا می کند. مقادیر زیاد و کم NO_x به ترتیب در هسته مرکزی گرم و نواحی دما پایین یافت می شود. چرخش باعث ایجاد بازگشت گازهای خروجی (FGR) نزدیک شعله می کند.

واژه های کلیدی: اغتشاش، چرخش، NO_x ، غیرپیش آمیخته.

Numerical Study of the Effect Swirl Air on Turbulence and NO_x Formation in Methane-Air Combustion

P. Baziar, Dept. Of Mech. Eng., FZA. University
A. Fahimi rad , Dept. Of Mech. Eng., FZA. University

Abstract: One of methods decrease nitro oxides (NO_x) is increase the turbulence. In present study, to understood effect of swirl on turbulence stringency and NO_x formation, Methane - air non premix turbulent combustion has been simulated. Numerical simulation has been performed for cylindrical combustor that it is axi-symmetric in various equivalences ratio and swirl angle and simultaneously by numerical simulation, using PDF turbulence chemistry model. For prediction value of NO_x formation and turbulence simulation is used a NO_x post-processor of the Fluent code and k- ϵ model, respectively. The simulated results compare with other experimental results and are in overall agreement with the measured results. Results show that with increase swirl number, turbulence stringency in first low decrease and then high increase. Also with increase turbulence, temperature and NO_x decrease in exit of combustor. High and low quantities of NO_x detected hot central core and high temperature zone, respectively. Swirl product flow gas recirculation in near of flame.

Keywords: Turbulenc, Swirl, NO_x , Non premixed.

۱- مقدمه

احتراق چرخشی به گستردگی در محفظه های احتراق توربین گاز، مشعل های چرخشی و محفظه های احتراق چرخشی بکار گرفته شده است [1,2]. ایده استفاده از چرخش برای کم کردن اغتشاش و کاهش تشکیل NO_x به وسیله بیر (Beer) پیشنهاد داده شد [3]. جریان چرخشی در ۲ دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است که تقریباً بطور کامل در مطالعه علمی سایرد (Syred) [4] و گوپتا (Gupta) تشریح شده است [5]. چرخش نه تنها می تواند بر مشخصات احتراق اثر بگذارد، بلکه بر تشکیل NO_x نیز تاثیر می گذارد [6]. چرخش ابزاری برای پایدار کردن شعله و بالا بردن و کنترل انتقال حرارت است و بازده احتراق را افزایش می دهد [7,8] 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 [9]. برای رسیدن به انتشار NO_x کم، چرخش از دیگر تکنیک های احتراق شبیه مرحله ای کردن، FGR، دوباره سوختن کاملتر است [10]. بعضی محققین افزایش در تشکیل NO_x را با افزایش در عدد چرخش گزارش می دهند [6]، دیگر محققین کاهش در تشکیل NO_x را با افزایش در عدد چرخش گزارش می دهند [11]. تاثیر عدد چرخش بر روی NO_x یک پدیده مرکب است. تغییر عدد چرخش بر ناحیه جریان شامل محل، سایز، ناحیه برگشت و دمای شعله، توزیع غلظت گونه ها و شدت آشفستگی اثر خواهد گذاشت. همه اینها در تشکیل NO_x موثر است، اما مشخص نیست که کدام تاثیر بیشتری بر روی تشکیل NO_x دارد [6]. بیشتر نویسندگان و محققان از مدل PDF برای شبیه سازی کردن تشکیل NO_x در جریان های متلاطم استفاده می کنند [12]. در این مقاله ما مطالعه عددی تاثیر چرخش را بر روی تشکیل NO_x در احتراق چرخشی مغشوش متان- هوا انجام دادیم. همچنین مدل اغتشاش استفاده شده $k-\epsilon$ است. مدل اغتشاش $k-\epsilon$ در بر گیرنده دو معادله نیمه تجربی مدل ویسکوزیته جریان متلاطم است که برای انرژی جنبشی (k) و سرعت پراکندگی آن (ϵ) حل می شود. ضعف این مدل، نتایج آن در انرژی اغتشاش زیاد است [13]. از سال ۱۹۸۰، مدل PDF بعنوان تقریب خوب برای مدل کردن اغتشاش توسعه و نشان داده شده است [14-16]. معیار چرخش حول محور مرکزی با پارامتر بی بعدی به نام عدد چرخش (S) معرفی می شود. عدد چرخش برابر است با نسبت شار محوری مماسی به شار محوری عمودی و به صورت زیر است [17]:

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

که در آن R شعاع چرخنده است. برای پیش بینی انتشار NO_x ، از پیش پردازنده NO_x استفاده شده است. غلظت آلاینده NO_x محاسبه شده با مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی دیگر محققین روند خوبی را نشان می دهد.

۲- شرایط مرزی شبیه سازی

کوره شبیه سازی شده یک محفظه احتراق است که دارای طول 1000 mm و قطر داخلی 105 mm است. در محفظه احتراق فرض شده سوخت از طریق نازلی به قطر داخلی 6 mm و هوا از لوله مرکزی ورودی به قطر 35 mm تامین شده است. که چرخنده های با زاویه تیغه مختلف برای دستیابی به جریان های چرخشی با اعداد چرخش مختلف نصب شده است. عدد چرخش چنین معرفی می شود [18]:

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

که Θ زاویه پره و σ_r نسبت قطر داخلی به قطر خارجی چرخنده است. زوایای پره استفاده شده در این تحقیق ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه است. قطر داخلی چرخنده 6 mm و قطر خارجی آن 35 mm است. بنابر این اعداد چرخش بترتیب ۰، 0.12، 0.58 و 1.2 است. شرایط مرزی دیواره به صورت دما ثابت و در دمای 750 k قرار داده شده است. شکل ۱ هندسه کوره شبیه سازی شده را نشان می دهد.

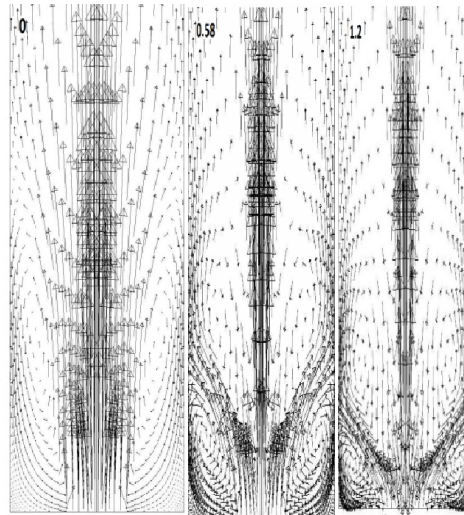


شکل ۱- کوره شبیه سازی شده

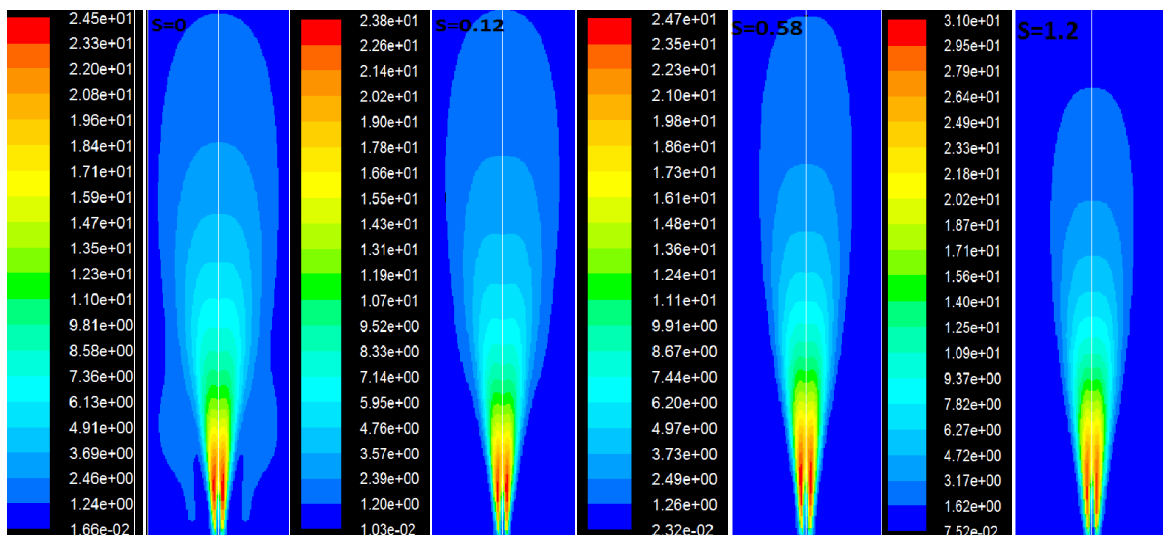
۳- نتایج و بحث

سراسر ساختار ناحیه جریان گاز اساساً می تواند به سه قسمت تقسیم شود: یک ناحیه برگشت مارپیچی مرکزی (Center toroidal recirculation zone, CTRZ)، که به خاطر گرادیان فشار مخالف القا شده به وسیله چرخش ایجاد می شود، ناحیه برگشت گوشه (Corner recirculation zone, CRZ)، به سبب انبساط شعاعی جریان و دیواره ایجاد می شود 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. در شکل ۲ این نواحی به طور کامل با بردارهای جریان توسط شبیه سازی نشان داده شده است. نتایج نشان داده که با افزایش عدد چرخش از ۰ تا ۱.۲، مقدار شدت جریان برگشتی در ناحیه انبساطی گوشه کم می شود و با افزایش عدد چرخش از ۰.۵۸ تا ۱.۲، درون جریان دو گردابه ایجاد می شود که این همان ناحیه CTRZ است که به خاطر تاثیر چرخش است. جریان رو به جلو و رو به عقبی که توسط این گردابه به وجود می آید، باعث افزایش اختلاط سوخت و هوا و همچنین باعث افزایش نرخ احتراق شده و البته تاثیر زیادی بر روی آلاینده NO_x دارد و ایجاد FGR داخلی نزدیک شعله کرده است. باید خاطر نشان کرد که ایجاد گردابه ها در محفظه های احتراق مختلف متفاوت است. قطر محفظه احتراق می تواند در تشکیل این گردابه ها تاثیر زیادی داشته باشد.

در شکل ۳ کانتورهای اغتشاش برای اعداد چرخش مختلف و در نسبت هم ارزی ۰.۹ در ابتدای محفظه احتراق نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده شده که با افزایش عدد چرخش اغتشاش ابتدا کاهش کم و سپس افزایش پیدا می کند که با افزایش اغتشاش، اختلاط سوخت و هوا افزایش پیدا کرده و گستره ماکزیمم دمای شعله افزایش یافته است. البته ماکزیمم دمای شعله کاهش پیدا می کند. در واقع با افزایش اختلاط میزان نواحی که احتراق کامل در آن ایجاد می شود افزایش پیدا می کند که این موضوع باعث افزایش راندمان احتراق شده و البته در نهایت بر روی انتشار آلاینده ها نیز تاثیر می گذارد.



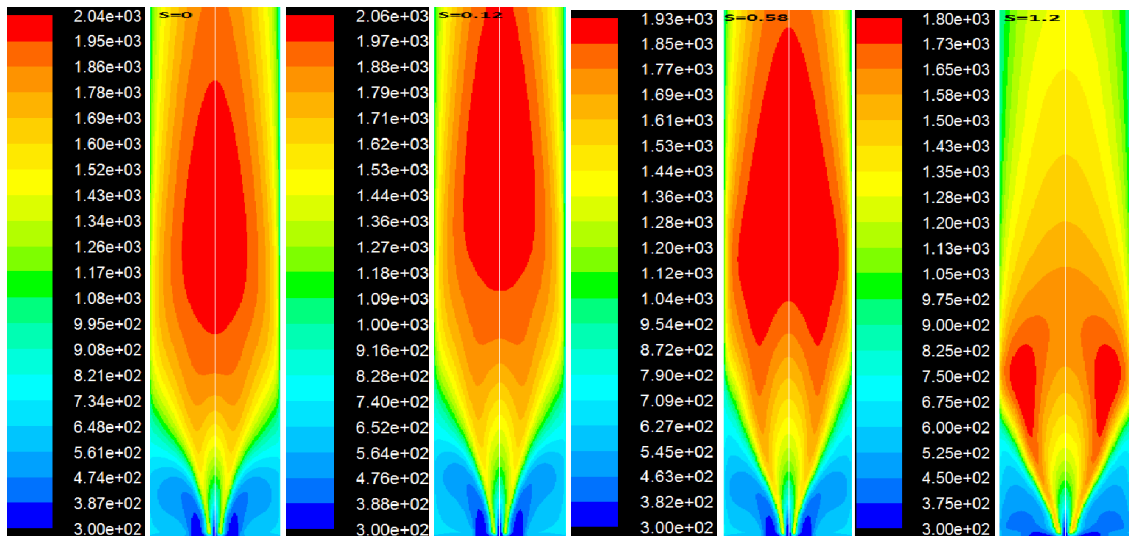
شکل ۲- بردار جریان برای اعداد چرخش مختلف



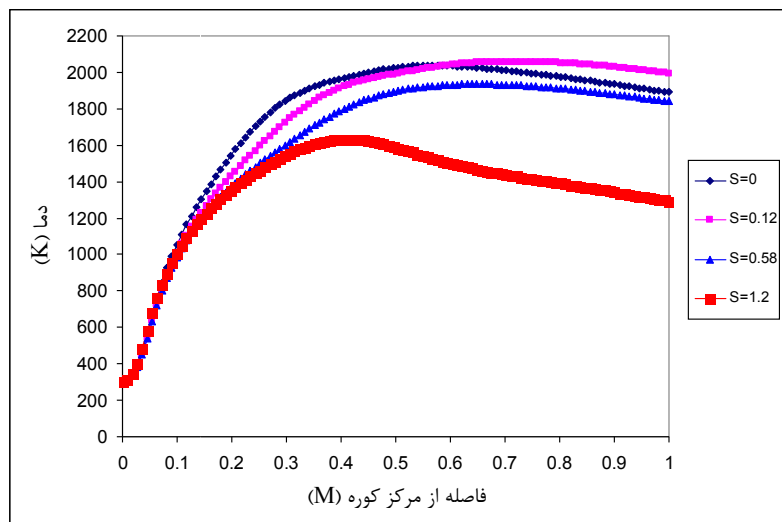
شکل ۳- کانتورهای اغتشاش برای اعداد چرخش مختلف در نسبت هم ارزی $0.9 (m^2/s^2)$

در شکل ۴، کانتورهای دمای را برای نسبت هم ارزی 0.9 و در بعضی عددهای چرخش نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود که در عددهای چرخش پایین، نواحی دما بالا در انتهای کوره نیز یافت شده است. نتایج نشان داده که با افزایش عدد چرخش طول شعله کاهش پیدا کرده و ماکزیمم دمای شعله به سمت ورودی محفظه احتراق متمایل شده است. همچنین با افزایش عدد چرخش از 0.12 تا 1.2 دما در ناحیه خروجی کوره کاهش پیدا می کند که این تغییرات دما با تابع نمایی تاثیر زیادی بر روی NO_x دارد.

در شکل ۵، نمودار دما شبیه سازی شده در طول محور تقارن کوره برای نسبت هم ارزی 0.9 نشان داده شده است. در نمودار تغییرات دما برای اعداد چرخش مختلف رسم شده است. همانطوری که نتایج شبیه سازی نشان داده، با افزایش عدد چرخش در تمام نسبت های هم ارزی، ابتدا در عدد چرخش 0.12 یک افزایش کم و با بالا رفتن عدد چرخش تا 1.2 کاهش در دما ایجاد شده است.



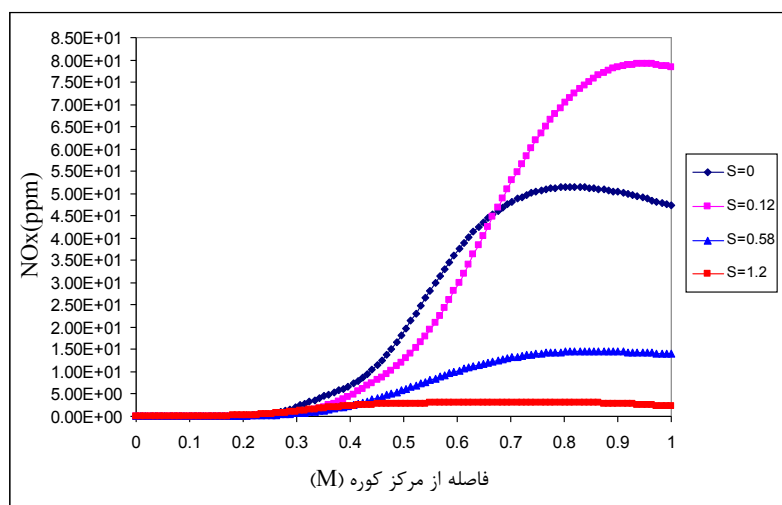
شکل ۴- کانتورهای دما برای اعداد چرخش مختلف در نسبت هم ارزی ۰.۹ (K)



شکل ۵- نمودار دما در طول محفظه احتراق در نسبت هم ارزی ۰.۹ و برای تمام اعداد چرخش

در شکل ۶ تغییرات NO_x در نسبت هم ارزی ۰.۹ و برای اعداد چرخش مختلف در محور تقارن کوره نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می شود، NO_x در فاصله 25 cm ابتدا کوره یعنی جایی که شعله وجود دارد، تشکیل شده است. نتایج نشان داده که با افزایش عدد چرخش از ۰ تا ۰.۱۲، ماکزیمم مقدار NO_x افزایش کمی پیدا کرده و سپس با افزایش عدد چرخش تا ۱.۲ این مقدار کاهش پیدا کرده است. این تغییرات به خاطر تاثیر دما بر روی NO_x است. با مقایسه این نمودارها با نمودارهای دما، این تاثیر مشاهده می شود.

در شکل ۷ نتایج شبیه سازی NO_x تشکیل شده در خروجی کوره برای نسبت های هم ارزی مختلف نشان داده شده است. در تمام نسبت های هم ارزی مشاهده شده که با افزایش عدد چرخش NO_x ابتدا افزایش کم و سپس در اعداد چرخش بالا به شدت کاهش یافته است و به کمترین مقدار در عدد چرخش ۱.۲ رسیده است. با نگاهی به روند افزایشی و کاهشی دما آشکار است که روند متفاوت کاهش و افزایش NO_x وابستگی کامل به دما دارد. این روند کاهشی و افزایشی دما نیز به ساختار شعله شکل گرفته در عددهای چرخش بالا بر می گردد. در عددهای چرخش بالا با ایجاد ناحیه برگشتی CTRZ در نزدیک شعله اختلاط سوخت و هوا بیشتر شده و این نوع چرخش باعث می شود مقداری از محصولات احتراق تشکیل شده در ابتدای شعله بازگشت کرده و مجددا وارد واکنش با هیدروکربنها می شوند 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 اعداد چرخش بالا شده است.



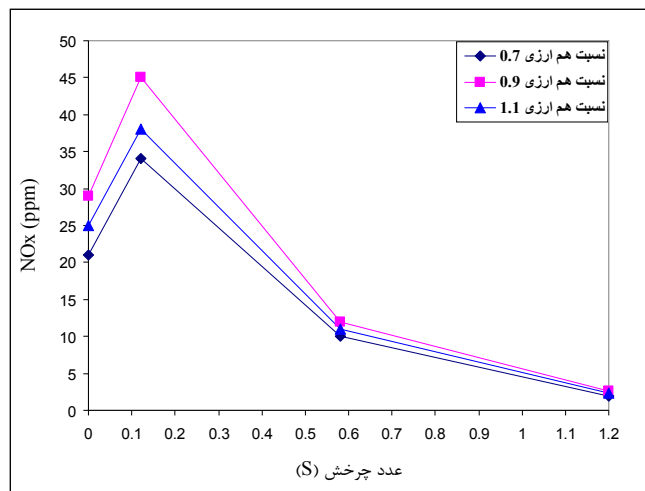
شکل ۶. نمودار NO_x در طول محفظه احتراق در نسبت هم ارزی ۰.۹ و برای تمام اعداد چرخش

شکل ۸ مقایسه غلظت NO_x در آخرین ناحیه عبوری برای عددهای چرخش مختلف و در نسبت هم ارزی ۰.۷ با نتایج آزمایشگاهی کووارک (Kwark) و همکارانش [18] نشان می دهد. همانطوری که مشاهده می شود روند نتایج شبیه سازی نتایج آزمایشگاهی است، البته اختلافی در نقطه ای که NO_x کاهش پیدا می کند وجود دارد. این اختلاف به دلیل خطا در آزمایش آنها و البته شاید عدم شبیه سازی درست دما دیواره باشد.

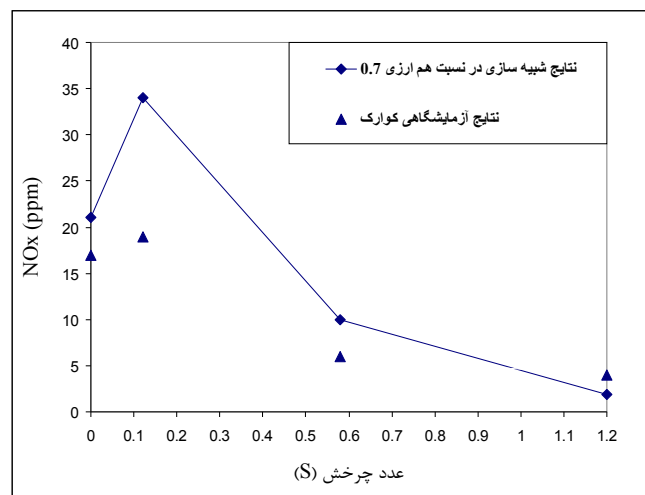
۴- نتیجه گیری

نتایج شبیه سازی تاثیر چرخش هوا بر روی شدت اغتشاش و میزان تشکیل NO_x برای حالت غیر پیش آمیخته مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر می باشد.

- با اعمال چرخش ناحیه جریان به سه ناحیه: ناحیه برگشت ماریپیچی مرکزی (CTRZ)، ناحیه برگشت گوشه (CRZ)، و لایه های برشی دوتایی (لایه های داخلی CTRZ و لایه های بیرونی اطراف CTZ) تقسیم شده است.



شکل ۷. نمودار NO_x در خروجی محافظه احتراق



شکل ۸ - مقایسه میانگین غلظت NO_x در خروجی با نتایج آزمایشگاهی [18] در نسبت هم ارزی 0.7

- با افزایش عدد چرخش، شدت اغتشاش ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا می کند.
- با افزایش عدد چرخش، طول شعله کاهش پیدا کرده و ماکزیمم دمای شعله به سمت ورودی محافظه احتراق متمایل شده است.
- با افزایش عدد چرخش، ابتدا در عدد چرخش ۰.۱۲ یک افزایش کم و با بالا رفتن عدد چرخش کاهش در دما ایجاد شده است.
- با افزایش عدد چرخش، ابتدا افزایش کم و سپس در اعداد چرخش بالا به شدت کاهش می یابد و به کمترین مقدار در عدد چرخش ۱.۲ رسیده است.

۵- مراجع

[1] Yang. W, Zhang. J, " Simulation of methane turbulent swirling flame in the TECFLAM combustor", Applied Mathematical Modelling 33,pp. 2818-2830, 2009.

[2] Shang. Q, Zhang. J, " Simulation of gas-particle turbulent combustion in a pulverized coal-fired swirl combustor", Fuel 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," paper IL6, Third International Conference on Combustion and Technology for a Clean Environment, Lisbon, 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*, Volume 29,pp, 2235-2242, 2002.
- [7] Chen. Z, Li. Z , Jing. J, Chen. L, Wu. S, Yao. Y," Gas/particle flow characteristics of two swirl burners", *Energy Conversion and Management* 50, pp. 1180–1191, 2009.
- [8] Choi. C, Kim. C," Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler", *Fuel* 88,2009.
- [9] Kurose. R, Ikeda. M, Makino. H, Kimoto. M, Miyazaki. T. Pulverized Coal combustion characteristics of high-fuel-ratio coals. *Fuel*;83,pp, 1777–1785, 2004.
- [10] Peng. L, Zhang. J," Simulation of turbulent combustion and NO formation in a swirl combustor", *Chemical Engineering Science* 160,pp, 2903 – 2914, 2009.
- [11] Shaiful Ashrul Ishak. M, Mohammad Nazri Mohd. J," THE EFFECT OF SWIRL NUMBER ON REDUCING EMISSIONS FROM LIQUID FUEL BURNER SYSTEM", *Jurnal Mekanikal*, June 2005, No. 19, pp. 48 – 56,2005.
- [12] Zhou. L. X., *Adv. Mech. (China)*, 30, pp.77–82, 2000.
- [13] Thundil Karuppa Raj. R, Ganesan. V," Study on the effect of various parameters on flow development behind vane swirlers", *International Journal of Thermal Sciences* 47, pp.1204-1225, 2008.
- [14] L. Hack. M, Schmoker. J, Jenny. P," A Joint Probability Density Function (PDF) Model for Turbulent Premixed Combustion", *Proceedings of the European Combustion Meeting*, 2009.
- [15] Bazdidi-Tehrani. F, Zeinivand. H,"Presumed PDF modeling of reactive two-phase flow in a three dimensional jet-stabilized model combustor", *Energy Conversion and Management* 51,pp. 225–234, 2010.
- [16] Pope SB. PDF methods for turbulent reactive flows. *Prog Energ Combust*;11:119–92, 1985.
- [17] Khelil. A, H. Naji , Loukarfi. L , Mompean. G , " Prediction of a high swirled natural gas diffusion flame using a PDF model", *Fuel* 88, pp. 374-381, 2009.
- [18] JI-HYUN KWARK, YONG-KI JEONG, CHUNG-HWAN JEON, and YOUNG-JUNE CHANG," Effect of Swirl Intensity on the Flow and Combustion of a Turbulent Non-Premixed Flat Flame", *Flow, Turbulence and Combustion* 73, pp. 231–257, 2004.