

تأثیر شرایط مرزی اکسیدکننده بر تولید اکسیدهای نیتروژن در یک محفظه احتراق

سید عبدالمهدی هاشمی^{۱*}، ابوالفضل فتاحی^۲، قنبرعلی شیخ زاده^۳، مجید نیکفر^۲

کاشان - بلوار قطب راوندی - دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی مکانیک

hashemi@kashanu.ac.ir *

چکیده

در مقاله حاضر یک کوره متقارن محوری با شعله غیر پیش آمیخته متان و هوا شبیه سازی شده است. شبیه سازی با استفاده از مدل β -PDF و مدل آشفستگی k- ϵ انجام شده است. پس از تأیید اعتبار حل عددی با نتایج آزمایشگاهی اثر پارامترهای مرزی مختلفی بر تولید اکسیدهای نیتروژن بررسی شده است. مشاهده شد با تغییر شرایط مرزی مانند زاویه ورودی هوا و آشفستگی ورودی هوا میتوان مقدار اکسیدهای نیتروژن تولید شده را به نحو قابل توجهی کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: شعله غیر پیش آمیخته - کاهش آلاینده اکسید نیتروژن - زاویه ورودی - شدت آشفستگی - پیش گرمایش هوا

۱- مقدمه

محفظه‌های احتراق به‌عنوان اجزایی که در تمام موارد وابسته به صنعت احتراق نقش مهمی دارند، نیازمند توجه و بررسی‌های مطالعاتی بیشتری هستند. نقش مهم محفظه‌های احتراق در صنعت بخصوص در نیروگاه‌های تولید برق، لازمه توجه به کاهش تولید آلودگی این اجزاء را بیشتر روشن می‌سازد. با توجه به هزینه بالای مطالعات آزمایشگاهی، استفاده از شبیه‌سازی عددی به عنوان یک ابزار سودمند در مطالعات احتراقی مطرح است. هرچند به علت فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی فراوانی که در آن رخ می‌دهد (مانند جریان آشفته، احتراق، انتقال حرارت تابشی و همچنین تداخل و پیوستگی این موارد با یکدیگر) شبیه‌سازی عددی نیز کاری دشوار و پیچیده است.

اتخاذ قوانین و استانداردهای دشوار در کشورهای صنعتی، تحقیقات در زمینه کاهش آلاینده‌ها را به جزئی لاینفک در مراکز تولیدی تبدیل کرد. از جمله مهمترین آلاینده‌ها که بیشترین تمرکز را به خود اختصاص داده اکسیدهای نیتروژن می‌باشند که برای کنترل آن‌ها قوانین سخت‌گیرانه‌ای به‌خصوص در اروپای غربی و آمریکای شمالی وضع شده است. پیش‌بینی میزان اکسیدهای نیتروژن از جمله مطالعات محققان بسیاری بوده است. هان و وندت [۱] برای اولین بار نرخ تولید NO را برای یک شعله آرام غیر پیش‌آمیخته پیش‌بینی کردند. پس از آن، با افزایش توجهات به تخریب لایه اوزون و باران‌های اسیدی مطالعات بیشتری در ارتباط با تولید NO_x صورت گرفت. چن و چانگ [۲] تولید NO را در یک شعله آشفته غیر پیش‌آمیخته با استفاده از مدل تابع احتمال جرم مخصوص و مدل سنتی شعله آرام کوچک پیش‌بینی کردند. آن‌ها اثرات متفاوتی مانند انتقال حرارت تابشی بر تولید NO را با مقایسه مقادیر عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند نادیده گرفتن انتقال حرارت تابش حتی تا سه برابر می‌تواند مقدار NO را کمتر پیش‌بینی کند. یاماشیتا [۳] یک روش جدید محاسبه تولید NO_x را با استفاده از روش چن و چانگ ارائه دادند. لالمنت و همکاران [۴] نشان دادند که با افزایش نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی، تولید

۱- استادیار، دانشگاه کاشان

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه کاشان

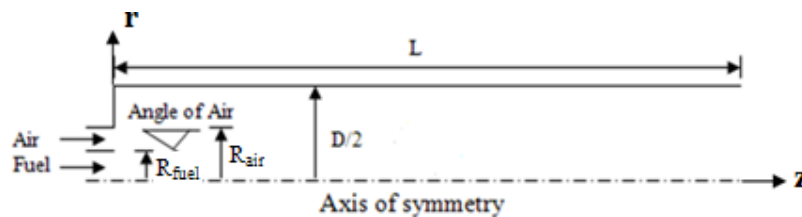
۳- دانشیار، دانشگاه کاشان

NO_x افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند با افزایش N_2 در اکسیژن (حداکثر تا ۱۹٪) مقدار NO_x افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر N_2 در اکسیژن (۱۹٪ تا ۴۷٪) مقدار NO_x کاهش می‌یابد. ساکر و همکاران [۵] اثر شدت جریان آشفته را بر روی شکل شعله غیر پیش‌آمیخته بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند شدت جریان آشفته بر روی شکل و اندازه شعله اثرگذار است.

در تحقیق حاضر یک محفظه احتراق استوانه‌ای با تقارن محوری با هندسه ساده و متداول در صنایع احتراقی در نظر گرفته شده و احتراق آشفته سوخت گازی متان با هوا در آن مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان پیوسته سوخت از یک مجرای محوری مرکزی و جریان اکسید کننده از یک مجرای حلقوی اطراف مجرای سوخت وارد محفظه می‌شوند. معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی و جزءها با استفاده از روش عددی حجم محدود و به کمک نرم افزار FLUENT حل شده‌اند. برای مدل‌سازی اثر آشفته‌گی بر احتراق از مدل تأیید اعتبار شده β -PDF استفاده شده است. همچنین از مدل آشفته‌گی Realizable k- ϵ استفاده شده است. در این مطالعه اثر تغییر برخی شرایط مرزی هوای ورودی چون پیش گرمایش هوا، زاویه ورودی و نرخ آشفته‌گی ورودی هوا بر تولید اکسیدهای نیتروژن مورد بحث قرار گرفته اند.

۲- هندسه و شرایط مرزی

شکل ۱ هندسه متقارن محوری از محفظه احتراق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مطابق طرح آزمایشگاهی [۶] اندازه شعاع ورودی سوخت (متان خالص) و شعاع ورودی هوا به ترتیب برابر ۲۹,۵mm و ۴۶,۵mm می‌باشد. طول محفظه (L) برابر ۱,۷m و قطر آن (D) برابر ۱۲۲,۳mm است. نرخ جریان جرمی متان و هوا به ترتیب ۷,۲g/s و ۱۳۷g/s می‌باشد. دمای ورودی برای هوا و متان ۳۰۰K می‌باشد. مقدار شدت آشفته‌گی ورودی برای هر دو جریان سوخت و اکسیدکننده ۱۵٪ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- طرح کلی هندسه مورد مطالعه

جریان در فشار ۱ bar محفظه را ترک می‌کند. دمای دیواره‌ها برابر ۵۰۰K می‌باشد. ضریب صدور دیواره‌ها برابر ۰,۷ در نظر گرفته شدند.

۳- الگوریتم حل، معیار همگرایی و استقلال حل از شبکه

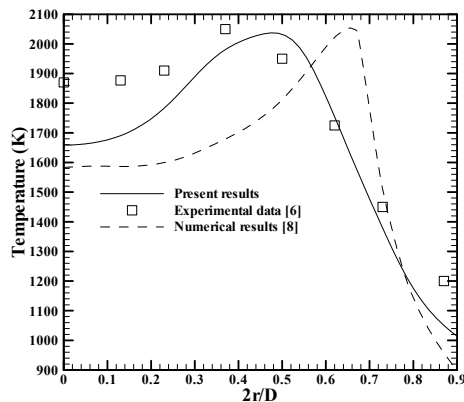
برای مش‌بندی مدل جهت شبیه‌سازی از نرم‌افزار گمبیت [۷] استفاده شده است. برای گسسته‌سازی جملات معادلات از تقریب مرتبه دو بالادست و برای کوپل کردن جملات فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. حل‌کننده تفکیکی به‌صورت ضمنی به‌کار گرفته شده است. معیار همگرایی 10^{-6} برای باقیمانده جملات معادله انرژی و 10^{-4} برای سایر معادلات در نظر گرفته شده است. به‌منظور یافتن تعداد سلول‌های مناسب شبکه برای شبیه‌سازی عددی، دما در خروجی محفظه برای تعداد سلول‌های متفاوت مقایسه شده است. با توجه به نتایج جدول ۱ تعداد ۲۴۰۰۰ سلول مناسب به‌نظر می‌رسد.

به‌منظور تأیید اعتبار روش عددی، نتایج حل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی [۶] و عددی [۸] مقایسه شده است. شکل ۲ مقایسه بین سرعت‌های محوری برای $z/D=0,052$ را نشان می‌دهد. مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های تجربی هم‌خوانی مناسبی را در رفتار و مقادیر نشان می‌دهند.

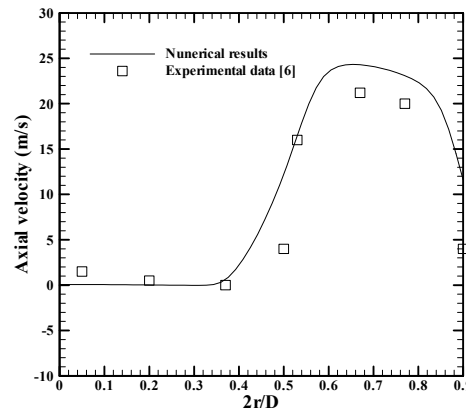
جدول ۱- بررسی استقلال حل از شبکه

تعداد سلول	دمای محاسبه شده در خروجی (K)	درصد اختلاف با حالت قبل (%)
۱۲۰۰۰	۱۲۳۵	-
۱۹۵۰۰	۱۳۱۸	۷
۲۴۰۰۰	۱۳۸۹	۵
۳۳۰۰۰	۱۳۹۵	۰.۵

شکل ۳ مقایسه بین سه دسته نتایج را برای دما در موقعیت $z/D=1.99$ ارائه می‌دهند. مقادیر پیش‌بینی شده مطابق خوبی با داده‌های تجربی دارند. پیش‌بینی عددی در مطالعه حاضر از لحاظ مقادیر و رفتار برتری خود را نسبت به حل عددی مرجع [۸] نشان می‌دهد. در $z/D=1.99$ مقادیر حاصل از پیش‌بینی عددی حاضر، داده‌های تجربی و داده‌های عددی موقعیت دمای حداکثر را به ترتیب در 48mm و 38mm و 68mm نشان می‌دهند. به همین ترتیب مقدار حداکثر دما 2045K و 2036K می‌باشد.



شکل ۳- پروفیل دما در $z/D=1.99$: مقایسه بین نتایج حاضر و نتایج مراجع [۶] و [۸]



شکل ۲- پروفیل سرعت محوری در $z/D=0.052$: مقایسه نتایج حاضر و نتایج مرجع [۶]

برای مقایسه بیشتر، دما و غلظت میانگین NO_x در خروجی محفظه از تحقیق حاضر و نتایج عددی مرجع [۹] در جدول ۲ مقایسه شده است. هندسه مورد مطالعه مرجع [۹] جز در ابعاد مشابه با شکل ۲ می‌باشد. طول محفظه مورد مطالعه برابر 2m و شعاع ورود سوخت و اکسیدکننده به ترتیب 0.005m و 0.15m می‌باشد. قطر محفظه برابر 0.6m است. چنانکه مشاهده می‌شود، هم‌خوانی خوبی بین دو دسته نتایج وجود دارد. اختلافات موجود به علت به کارگیری روش‌های متفاوت در مدل‌سازی آشفستگی و احتراق است.

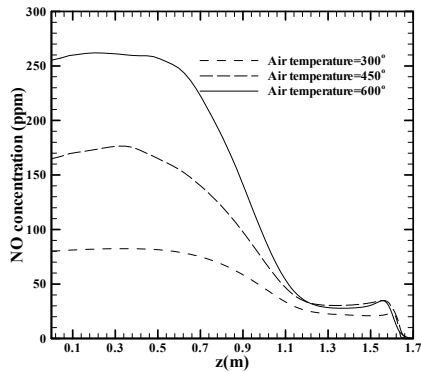
جدول ۲- مقایسه بین نتایج حاضر و نتایج عددی مرجع [۹]

	نتایج مرجع [۹]	نتایج حاضر	درصد اختلاف
دمای خروجی (K)	۱۳۱۱	۱۳۸۷	۵
NO_x (ppm)	۵۵۳	۶۰۱	۸

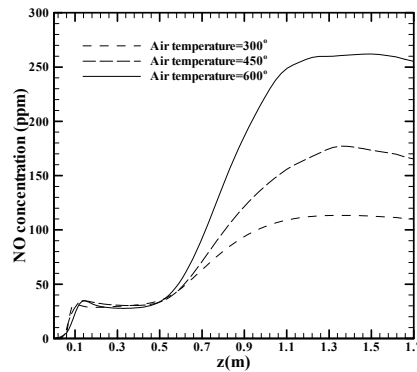
۴- نتایج

۴-۱- بررسی اثر پیش گرمایش اکسیدکننده

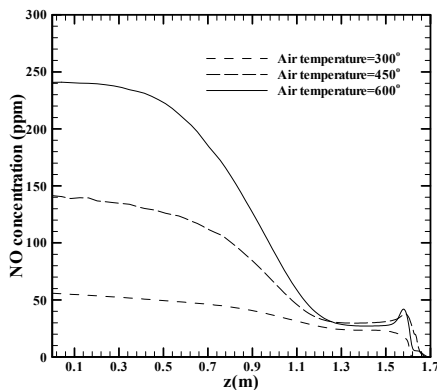
در این بخش، اثر تغییر دمای هوا (از ۳۰۰K به ۶۰۰K) بر تشکیل آلاینده‌ها بحث شده است. تغییرات محوری غلظت NO در موقعیت‌های شعاعی مختلف مطابق شکل ۴ ارائه شده است. واضح است که غلظت NO با افزایش دمای پیش گرمایش هوا به طور قابل ملاحظه افزایش می‌یابد. کاهش مقدار حداکثر NO در دو حالت افزایش دمایی از ۳۰۰K به ۴۵۰K و از ۴۵۰K به ۶۰۰K تقریباً یکسان است. در حالت $r/R = 0$ افزایش غلظت حدود ۳۴٪ برای هر دو حالت افزایش دمایی است. در موقعیت شعاعی $r/R = 0.6$ حداکثر مقدار NO در $z = 0.0$ رخ می‌دهد. در واقع با توجه به شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش غلظت NO با افزایش پیش گرمایش هوا متناسب است. شکل ۵ دمای حداکثر در محفظه را بر حسب دمای هوای ورودی نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد پیش گرمایش هوا از ۳۰۰K تا ۶۰۰K می‌تواند تا ۲۰٪ دمای حداکثر داخل محفظه را افزایش دهد و این می‌تواند یکی از دلایل افزایش غلظت NO باشد. هر چند پیش گرمایش هوا راندمان کوره را افزایش می‌دهد [۱۰]، اما با توجه به افزایش میزان آلاینده NO باید تغییر این پارامتر با دقت صورت گیرد.



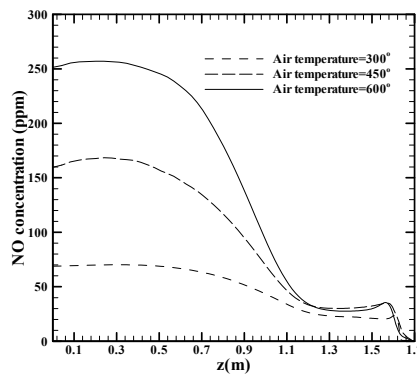
(ب)



(الف)



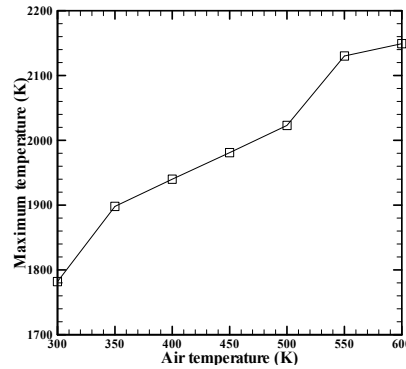
(د)



(ج)

شکل ۴- تغییرات محوری غلظت NO برای دماهای متفاوت پیش گرمایش هوا:

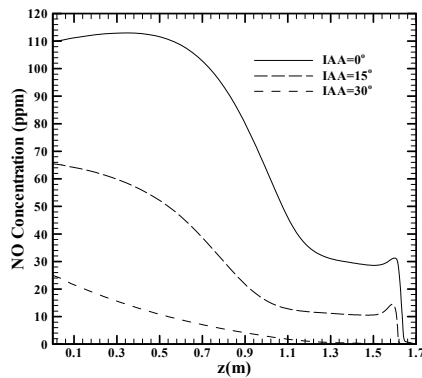
(الف) $r/R = 0.0$, (ب) $r/R = 0.1$, (ج) $r/R = 0.3$, (د) $r/R = 0.6$



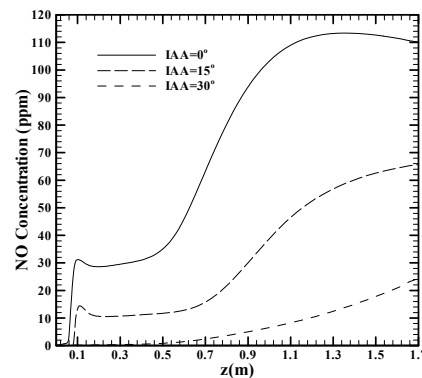
شکل ۵- دمای حداکثر داخل محفظه بر حسب دمای پیش گرمایش هوا

۴-۲- بررسی اثر زاویه دار کردن جت هوا

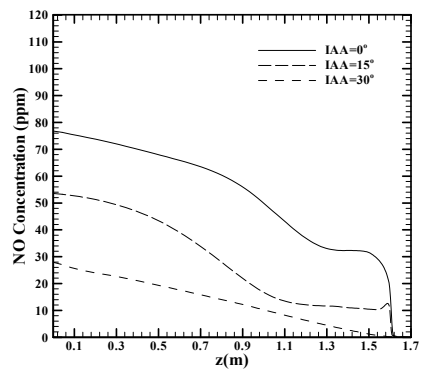
اثر زاویه دار کردن جت هوا برای زوایای مختلف در این بخش مطالعه می شود. زاویه جت با خط افق اندازه گیری می شود. زاویه جت هوا بین صفر تا ۳۰ درجه تغییر داده می شود. غلظت NO برای موقعیت های مختلف r/R در شکل ۶ آمده است. دیده می شود که غلظت NO با افزایش زاویه هوا کاهش می یابد.



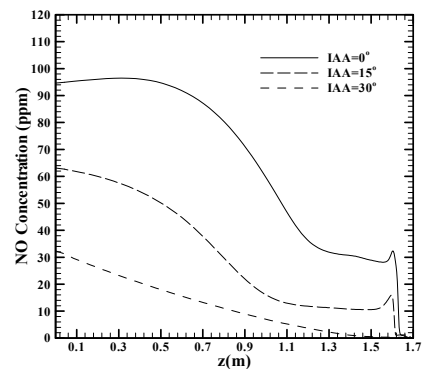
(ب)



(الف)



(د)



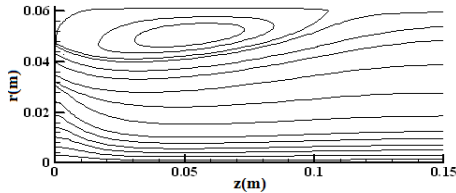
(ج)

شکل ۶- تغییرات محوری غلظت NO برای زوایای متفاوت جت هوا:

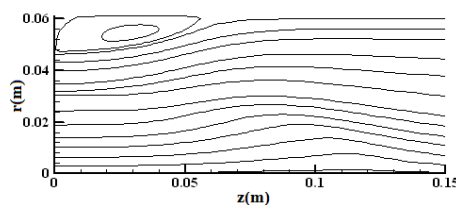
(الف): $r/R=0$, (ب) $r/R=0.1$, (ج) $r/R=0.3$, (د) $r/R=0.6$

کاهش غلظت با افزایش زاویه جت هوا از ۱۵ درجه به ۳۰ درجه جدی تر است. در $r/R=0$ ، کاهش حداکثر NO وقتی زاویه جت هوا از ۱۵ درجه تا ۳۰ درجه تغییر می کند حدود ۶۳٪ است. این کاهش برای تغییر زاویه از صفر به ۱۵ درجه تنها ۴۰٪ می باشد.

شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب خطوط جریان را برای دو زاویه جت هوا برابر با صفر و ۳۰ درجه نشان می دهند.

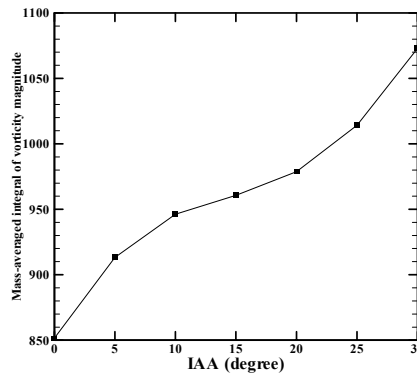


شکل ۸- خطوط جریان برای زاویه جت هوا برابر با ۳۰ درجه



شکل ۷- خطوط جریان برای زاویه جت هوا برابر با صفر درجه

واضح است که افزایش زاویه منجر به گسترش ناحیه چرخشی در محفظه احتراق می شود. ناحیه چرخشی برای زاویه جت هوا برابر با صفر تا $Z=0.06m$ و برای زاویه جت هوا برابر با ۳۰ تا $Z=0.11m$ گسترش می یابد. در این تحقیق، برای روشن کردن نقش تغییر زاویه هوای ورودی بر قدرت ناحیه چرخشی، انتگرال میانگین جرمی مقدار چرخش^۱ به عنوان یک پارامتر جدید به صورت $\frac{1}{m} \int \omega dm$ محاسبه شده است.



شکل ۹- انتگرال میانگین جرمی مقدار چرخش بر حسب زاویه هوا

شکل ۹ نشان می دهد افزایش مقدار زاویه جت هوا مقدار پارامتر مذکور را افزایش می دهد و بنابراین ناحیه چرخشی داخل محفظه احتراق توسعه می یابد. این مقدار با افزایش زاویه جت هوا از ۰ تا ۳۰ درجه حدود ۲۵٪ افزایش می یابد. در واقع کاهش NO که در شکل ۸ با افزایش زاویه جت هوا دیده شد به علت گسترش ناحیه چرخشی است. این ناحیه چرخشی باعث رقیق تر شدن گازهای داغ، کاهش دمای ناحیه شعله و نهایتاً کاهش غلظت NO می شود.

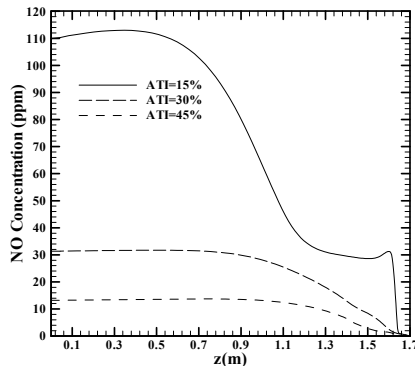
۳-۴- بررسی اثر شدت آشفته‌گی جریان هوا

تغییرات محوری غلظت NO در فاصله‌های شعاعی مختلف برای مقادیر مختلف شدت آشفته‌گی هوا^۲ در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۰ واضح است که غلظت NO با افزایش آشفته‌گی جریان هوا کاهش می یابد. کاهش در غلظت NO هنگام افزایش آشفته‌گی جریان هوا از ۱۵٪ به ۳۰٪ شدیدتر است. در این حالت و برای $r/R=0$ ، کاهش در حداکثر مقدار NO بیش از ۷۰٪ و برای $r/R=0.6$ حدود ۶۰٪ است. این کاهش برای افزایش آشفته‌گی جریان هوا از ۳۰٪ به ۴۵٪ و برای هر دو

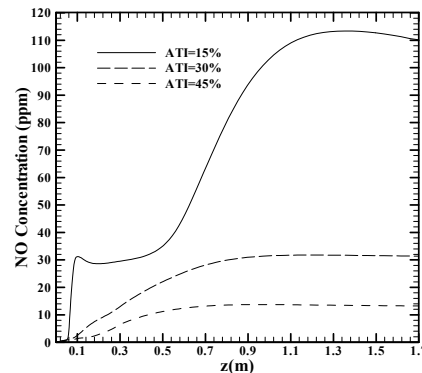
^۱Mass-averaged integral of vorticity magnitude

^۲Air Turbulent Intensity (ATI)

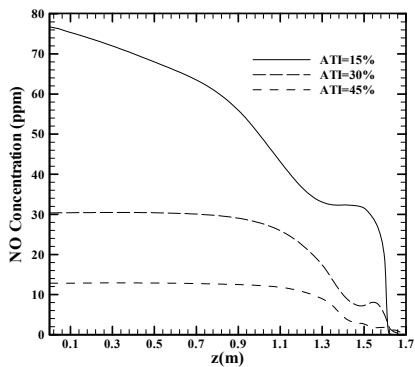
حالت $r/R = 0$ و $r/R = 0.6$ می باشد. موقعیت حداکثر NO با افزایش r/R به ورودی محفظه میل می کند؛ تا اینکه در $r/R = 0.6$ این حداکثر در موقعیت $z=0$ اتفاق می افتد. از شکل های مورد بحث می توان نتیجه گرفت کاهش غلظت NO با افزایش آشفته گی جریان هوا متناسب بوده و می توان با به کار بردن ابزارهایی برای افزایش این پارامتر (مانند صفحه های سوراخدار و سایر موانع در راه جریان) به کاهش این آلاینده در فرآیندهای صنعتی دست یافت.



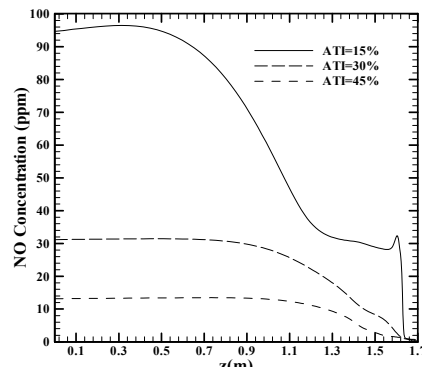
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۰- تغییرات محوری غلظت NO برای شدت های متفاوت آشفته گی جریان هوا:

(الف) $r/R = 0$, (ب) $r/R = 0.1$, (ج) $r/R = 0.3$, (د) $r/R = 0.6$

۵- نتیجه گیری

- پس از شبیه سازی عددی و تأیید اعتبار حل عددی با نتایج آزمایشگاهی میتوان نتایج اصلی زیر را برشمرد:
- (الف) پیش گرمایش اکسیدکننده تولید NO را افزایش میدهد.
 - (ب) با افزایش آشفته گی ورودی و زاویه ورودی اکسیدکننده، کاهش قابل ملاحظه در مقدار تولید NO رخ می دهد.
 - (ج) با افزایش زاویه ورودی اکسیدکننده قدرت ناحیه چرخشی ورودی افزایش می یابد.

مراجع

- 1- Hahn, W.A., and Wendt, J.O.L., *NOx formation in flat, laminar, opposed jet methane diffusion flames*, Symposium (International) on Combustion, Vol. 18(1), pp. 121-131, 1981.

- 2- Chen, J.Y., and Chang, W. C., *Flamelet and pdf modeling of CO and NOx emissions from a turbulent, methane hydrogen jet nonpremixed flame*, Symposium (International) on Combustion, Vol. 26(N2), pp. 2207-2214, 1996.
- 3- Yamashita, H., *Numerical study on NOx production of transitional fuel jet diffusion flame*, JSME International Journal, Series B, Vol. 43(1), pp. 97-103, 2000.
- 4- Lallemand, N.; Breussin, F.; Weber, R.; Ekman, T.; Dugue, J.; Samaniego, J. M.; Charon, O.; Van Den, A. J.; Van Der, J.; Fujisaki, W. Imanari, T.; Nakamura, T.; Iino, K., *Flame Structure, Heat Transfer and Pollutant Emissions Characteristic*, Journal of Institute of Energy, Vol. 73, pp. 169-182, 2000.
- 5- Saqr, K.M., Sies, M.M., Abdulwahid, M., *Numerical Investigation of The Turbulence-Combustion Interaction in Non-Premixed CH4-Air Flames*, International Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 5(8), pp. 69-79, 2009.
- 6- Owen, F. K., Spaddacini, L. J., and Bowman, C. T., Technical Report, EPA-600/2-76-247a, Washington, 1976.
- 7- GAMBIT User's Manual, Version 2.0.0, 2000.
- 8- Nisbet, J., Davidson, L. and Olsson, E., *Analysis of two fast-chemistry combustion models and turbulence modeling in variable density flow*, Computational Fluid Dynamics, Vol 1, 1992.
- 9- Ilbas, M., Yilmaz, I., and Kaplan, Y., *Investigations of Hydrogen and Hydrogen Hydrocarbon Composite Fuel Combustion and NOx Emission Characteristics in a Model Combustor*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, pp. 1139-1147, 2005.
- 10- Turns, S.R., and Mantel, S.J., *An Introduction to Combustion*, 2nd Edition, McGraw Hill, 2000.