

## تأثیر آشفته‌گی ورودی سوخت بر تولید اکسیدهای نیتروژن در یک محفظه احتراق

سید عبدالمهدی هاشمی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل فتاحی<sup>۲</sup>، قنبرعلی شیخ زاده<sup>۳</sup>، مجید نیکفر<sup>۴</sup>

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  $\beta$ -PDF و مدل آشفته‌گی  $k-\epsilon$  انجام شده است. پس از تأیید اعتبار حل عددی با نتایج آزمایشگاهی اثر پارامتر آشفته‌گی ورودی سوخت بر تولید اکسیدهای نیتروژن بررسی شد. مشاهده شد با تغییر این پارامتر میتوان مقدار اکسیدهای نیتروژن تولید شده را به نحو قابل توجهی کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: شعله غیر پیش آمیخته - کاهش آلاینده اکسید نیتروژن - شدت آشفته‌گی سوخت

### 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 به‌خصوص 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 آلاینده‌گی 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<sub>x</sub> 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 و همکاران [۳] یک روش جدید محاسبه

۱- استادیار، دانشگاه کاشان

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه کاشان

۳- دانشیار، دانشگاه کاشان

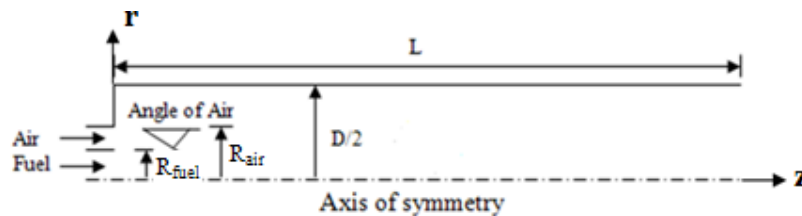
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان

تولید  $\text{NO}_x$  را با استفاده از روش چن و چانگ ارائه دادند. لالمنت و همکاران [۴] نشان دادند که با افزایش نسبت هم‌آزری مخلوط ورودی، تولید  $\text{NO}_x$  افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند با افزایش  $\text{N}_2$  در اکسیژن (حداکثر تا ۱۹٪) مقدار  $\text{NO}_x$  افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر  $\text{N}_2$  در اکسیژن (۱۹٪ تا ۴۷٪) مقدار  $\text{NO}_x$  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  $\beta$ -PDF استفاده شده است. همچنین از مدل آشفته‌گی Realizable  $k$ - $\epsilon$  استفاده شده است. در این مطالعه اثر تغییر نرخ آشفته‌گی ورودی سوخت بر تولید اکسیدهای نیتروژن در محفظه 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 ۱bar محفظه را ترک می‌کند. دمای دیواره‌ها برابر ۵۰۰K می‌باشد. ضریب صدور دیواره‌ها برابر ۰,۷ در نظر گرفته شدند.

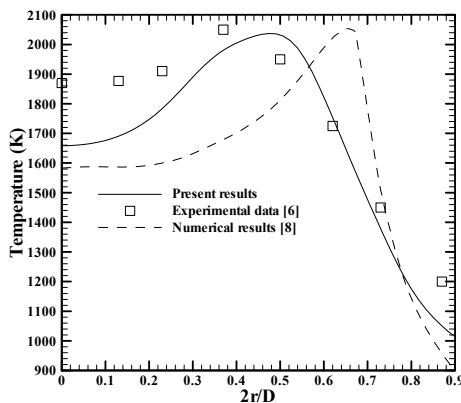
### ۳- الگوریتم حل، معیار همگرایی و استقلال حل از شبکه

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.

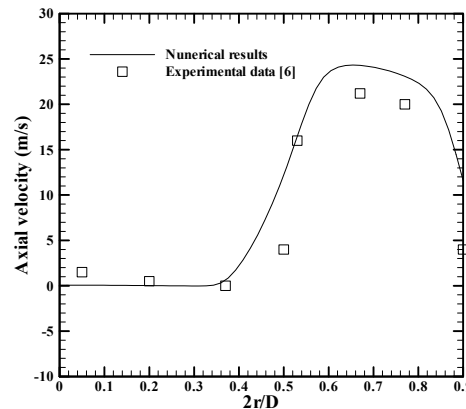
جدول ۱- بررسی استقلال حل از شبکه

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 مطابقت 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  $4\text{mm}$  و  $3,8\text{mm}$  و  $6,8\text{mm}$  نشان می‌دهند. به همین ترتیب مقدار حداکثر دما  $2045\text{K}$  و  $2036\text{K}$  و  $2059\text{K}$  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]

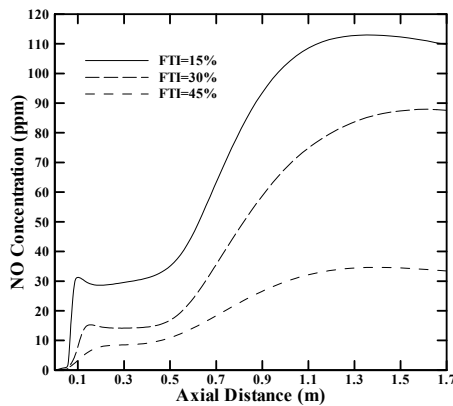
برای مقایسه بیشتر، دما و غلظت میانگین  $\text{NO}_x$  در خروجی محفظه از تحقیق حاضر و نتایج عددی مرجع [۹] جدول ۲ مقایسه شده است. هندسه مورد مطالعه مرجع [۹] جز در ابعاد مشابه با شکل ۲ می‌باشد. طول محفظه مورد مطالعه برابر  $2\text{m}$  و شعاع ورود سوخت و اکسیدکننده به ترتیب  $0,005\text{m}$  و  $0,15\text{m}$  می‌باشد. قطر محفظه برابر  $0,6\text{m}$  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]

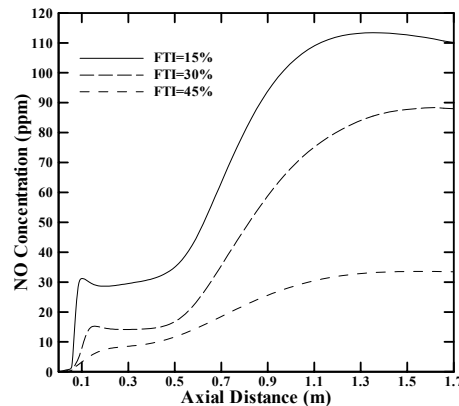
	نتایج مرجع [۹]	نتایج حاضر	درصد اختلاف
دمای خروجی (K)	۱۳۱۱	۱۳۸۷	۵
$\text{NO}_x$ (ppm)	۵۵۳	۶۰۱	۸

۴- نتایج

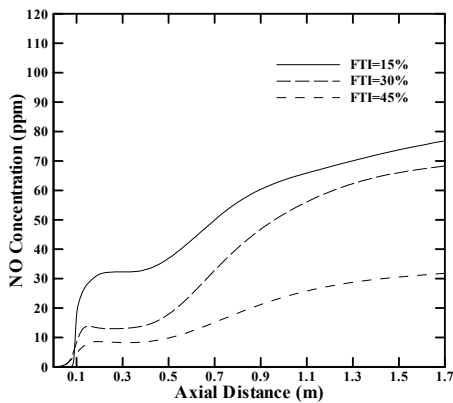
در شکل ۴ تغییرات محوری غلظت NO در موقعیت‌های شعاعی مختلف و برای مقادیر مختلف شدت آشفته‌گی جریان سوخت<sup>۱</sup> ارائه شده است. همانطور که ملاحظه میشود، با افزایش شدت آشفته‌گی جریان سوخت مقدار تولید NO کاهش می‌یابد. این کاهش برای افزایش FTI از ۳۰٪ به ۴۵٪ بیشتر از مقدار کاهش NO برای افزایش FTI از ۱۵٪ به ۳۰٪ میباشد. برای  $r/R=0$ ، کاهش مقدار بیشینه NO برابر ۲۲٪ برای افزایش FTI از ۱۵٪ به ۳۰٪ میباشد. در حالیکه مقدار کاهش بیشینه NO برای افزایش FTI از ۳۰٪ به ۴۵٪ حدود ۶۳٪ است. همچنین در نسبت  $r/R$  های بزرگتر موقعیت محوی حداکثر NO به خروجی محفظه میل میکند.



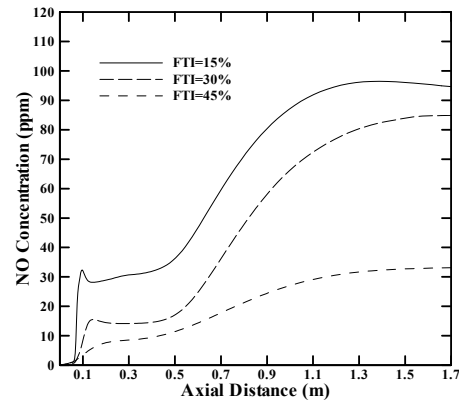
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

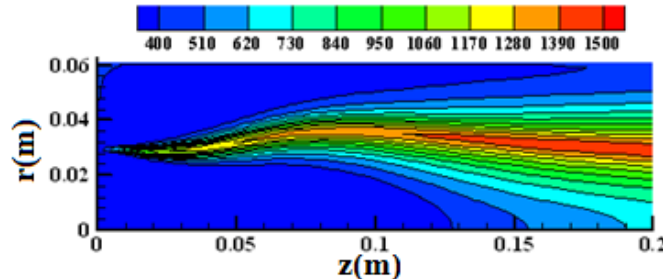
شکل ۴- تغییرات محوری غلظت NO برای شدت‌های متفاوت آشفته‌گی جریان سوخت:

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

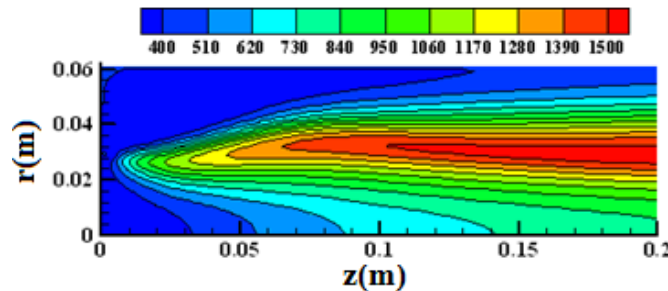
شکل ۵ خطوط همدمای را برای حالت شدت آشفته‌گی جریان سوخت برابر با ۱۵٪ نشان می‌دهد. یک ناحیه نازک با دمای بالا در داخل محفظه تشکیل می‌شود، در حالیکه سایر مناطق دارای دمای تقریباً یکنواختی می‌باشند. چنان‌که شکل ۶ نشان می‌دهد در حالتی که شدت آشفته‌گی جریان سوخت برابر با ۴۵٪ باشد، گرادیان دما در یک ناحیه خاص چندان شدید نیست و الگوی خطوط همدمای تقریباً یکنواخت است. با استفاده از این خطوط همدمای می‌توان رفتار تولید آلاینده NO را با افزایش شدت آشفته‌گی جریان سوخت ورودی توضیح داد. در حالتی که شدت آشفته‌گی جریان سوخت برابر با ۱۵٪ می‌باشد، گرادیان دمای بالا در یک ناحیه کوچک می‌تواند منجر به تولید NO زیاد گردد. در حالیکه برای شدت آشفته‌گی جریان سوخت برابر با ۴۵٪،

<sup>۱</sup>Fuel Turbulent Intensity (FTI)

گرادیان دما در کل محفظه تقریباً یکنواخت است. افزایش شدت آشفته‌گی جریان سوخت منجر به انتقال بهتر سوخت در اکسیدکننده و افزایش اختلاط خواهد شد و همین عامل باعث یکنواختی گرادیان دما و در نتیجه کاهش تولید آلاینده NO خواهد شد.



شکل ۵- خطوط هم‌دما داخل محفظه احتراق برای شدت آشفته‌گی جریان سوخت برابر با ۱۵٪



شکل ۶- خطوط هم‌دما داخل محفظه احتراق برای شدت آشفته‌گی جریان سوخت برابر با ۴۵٪

## ۵- نتیجه‌گیری

پس از شبیه‌سازی عددی و تأیید اعتبار حل عددی با نتایج آزمایشگاهی میتوان نتایج اصلی زیر را برشمرد:  
 الف) با افزایش آشفته‌گی ورودی سوخت، کاهش قابل ملاحظه در مقدار تولید NO رخ می‌دهد.  
 ب) در نسبت  $r/R$  های بزرگتر موقعیت محوی حداکثر NO به خروجی محفظه میل میکند.

## 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 CH<sub>4</sub>-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 NO<sub>x</sub> Emission Characteristics in a Model Combustor*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, pp. 1139-1147, 2005.