



## تحلیل عددی اثر هوادهی در تولید اکسید نیتروژن در محفظه احتراق مدل توربین گاز

موسی زکی<sup>1</sup>، مهران رجبی زرگرآبادی<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه سمنان، سمنان

2- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

\* سمنان، صندوق پستی 35131-19111، rajabi@semnan.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 آذر 1392

پذیرش: 03 بهمن 1392

ارائه در سایت: 05 مهر 1393

کلید واژگان:

احتراق، هوادهی

اکسید نیتروژن

مکانیزم حرارتی

مکانیزم انگیزته

### چکیده

اکسید نیتروژن از آلاینده‌های خطرناک محیط زیست محسوب می‌شود. کنترل تولید اکسید نیتروژن در فرآیند احتراق یک قید مهم در طراحی محفظه احتراق توربین‌های گاز مدرن است. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی جریان آشفته و فرآیند احتراق به‌صورت دوبعدی در یک محفظه احتراق مدل توربین گاز انجام شده است. از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و فرض استهلاک ادی به‌ترتیب برای شبیه‌سازی جریان آشفته و نرخ انجام واکنش احتراق استفاده شده است. همچنین، برای ارتباط معادلات سرعت- فشار الگوریتم سیمپل به‌کار گرفته شده است. مدل‌سازی و محاسبه میزان تولید اکسید نیتروژن از دو مکانیزم حرارتی و انگیزته برای سه سوخت مختلف متان، پروپان و پنتان انجام شده است. همچنین، تأثیر نسبت هم-ارزی و هوادهی در مجرای سوخت بر میزان تولید اکسید نیتروژن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که برای هر سه سوخت متان، پروپان و پنتان نسبت هم‌ارزی تأثیر قابل توجهی بر میزان تولید اکسید نیتروژن دارد. همچنین، هوادهی به شکل محسوسی میزان متوسط تولید اکسید نیتروژن در محفظه احتراق را کاهش می‌دهد.

## Numerical analysis of effects of primary aeration on NO<sub>x</sub> production in a model gas turbine combustion chamber

Moosa Zaki<sup>1</sup>, Mehran Rajabi-Zargarabadi<sup>2\*</sup>

1- Department of Aerospace Engineering, Semnan Univ., Semnan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Univ., Semnan, Iran

\*P.O.B. 35131-19111 Semnan, rajabi@semnan.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 15 December 2013  
Accepted 23 January 2014  
Available Online 27 September 2014

#### Keywords:

Combustion  
Primary aeration  
Nitrogen oxide  
Thermal mechanism  
Prompt mechanism

### ABSTRACT

The nitrogen oxide emission is known as a potentially hazardous pollutant in reacting flows. To improve this process, it is of fundamental importance to take into consideration environment protection through reduction of fuel consumption in addition to increasing combustion efficiency. The control of NO emission from the combustion process is an important design criterion in modern gas turbine technology. In the present work a two-dimensional combustion simulation is developed for a model gas turbine combustion chamber. The  $k-\epsilon$  turbulence model and the eddy dissipation concept model are applied for flow predictions and reaction rate simulation respectively. The flow field pressure linked equations are solved using the SIMPLE algorithm. In the present work, the thermal and prompt NO formations are estimated and calculated for three different methane, propane and pentane fuels. Also the effects of equivalence ratio and primary aeration on nitrogen oxide emission are considered. Results of numerical simulation show that the nitrogen oxide emission significantly affected by the equivalence ratio for all three type of fuels. Also by applying primary aeration the averaged nitrogen oxide production can be significantly reduced.

### 1- مقدمه

سیانو، اکسید نیتروژن<sup>1</sup>، دی‌اکسید نیتروژن، اکسید نیتروس<sup>2</sup> و آمین می‌شوند [3]. این آلاینده‌های نیتروژنی وابستگی زیادی به دما و نسبت هم‌ارزی در ناحیه احتراق دارند. بیش از 90 درصد آلاینده‌های نیتروژن طی این فرآیندها اکسید نیتروژن است. سهم هر یک از این گونه‌ها در یک فرآیند احتراقی با توجه به نوع شعله و سایر عوامل وابسته می‌تواند تغییر کند [4]. فرآیندهای مربوط به تشکیل و کاهش اکسید نیتروژن بسیار پیچیده بوده و مدل‌سازی جامع آن‌ها در سیستم‌های احتراقی نیازمند شبیه‌سازی دینامیک سیال

احتراق سوخت‌های هیدروکربنی منجر به تولید آلاینده‌های مخرب و اثرگذار بر محیط زیست، سلامت بشر و در نهایت گرم شدن کره زمین می‌شود [1]. از میان این آلاینده‌ها اکسیدهای نیتروژن را می‌توان به‌عنوان یک آلاینده موثر بر تخریب محیط زیست و لایه اوزون نام برد [2]. یکی از نگرانی‌های محققان و پژوهشگران در زمینه احتراق و انرژی، به‌خصوص در کشورهای صنعتی، به‌کارگیری روش‌هایی مبتنی بر افزایش راندمان احتراق و کاهش آلاینده‌هایی همچون اکسیدهای نیتروژن است. در حین فرآیند احتراق، نیتروژن هوای احتراقی و یا نیتروژن موجود در سوخت تبدیل به آلاینده‌های نیتروژنی شامل

1- NO  
2- N2O

Please cite this article using:

M. Zaki, M. Rajabi-Zargarabadi, Numerical analysis of effects of primary aeration on NO<sub>x</sub> production in a model gas turbine combustion chamber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 101-109, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 2- مدل سازی اکسیدهای نیتروژن

اکسیدهای نیتروژن از مکانیزم‌های مختلفی در فرآیند احتراق تشکیل می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها مکانیزم حرارتی و انگیخته است.

### 2-1- اکسید نیتروژن حرارتی

تشکیل اکسید نیتروژن حرارتی به وسیله مجموعه‌ای از واکنش‌های شیمیایی با دمای بالا، که معروف به مکانیزم زلدویچ هستند، تعیین می‌شود. واکنش‌های اصلی حاکم بر تشکیل اکسید نیتروژن حرارتی به صورت رابطه (1) و (2) هستند:



واکنش سوم نیز، که در شرایط نزدیک به استوکیومتری و سوخت غنی به تشکیل اکسید نیتروژن حرارتی منجر می‌شود، به صورت رابطه (3) است [15]:



تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مولکول نیتروژن نیازمند شکسته شدن پیوند قوی بین اتم‌های نیتروژن است و همین امر موجب وابستگی شدید این مکانیزم به درجه حرارت می‌شود. واکنش دوم دارای انرژی فعال‌سازی بالایی است و عامل محدود کننده نرخ واکنش در مکانیزم زلدویچ است. واکنش سوم نیز تحت شرایط سوخت غنی و نزدیک نواحی استوکیومتریک مهم است. با فرض اینکه نرخ مصرف اتم‌های آزاد نیتروژن مساوی نرخ تولید آن است، نرخ تشکیل اکسید نیتروژن گرمایی از رابطه (4) به دست می‌آید:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{f,1}[O][N_2] \left( \frac{1 - \frac{k_{r,1}k_{r,2}[NO]^2}{k_{f,1}[N_2]k_{f,2}[O_2]}}{1 + \frac{k_{r,1}[NO]}{k_{f,2}[O_2] + k_{f,3}[OH]}} \right) \quad (4)$$

که  $k_f$  و  $k_r$  به ترتیب مقادیر ثابت نرخ واکنش‌های تعادلی رفت و برگشت هستند. با توجه به اینکه نرخ تشکیل اکسید نیتروژن بسیار کمتر از نرخ اکسیداسیون هیدروکربن اصلی است، بیشتر اکسید نیتروژن حرارتی بعد از کامل شدن احتراق تشکیل می‌شود. در رابطه فوق غلظت‌های  $O_2$  و  $N_2$  از محاسبات احتراق تعیین می‌شود و غلظت رادیکال  $[OH]$  و  $[O]$  از روابط (5) و (6) به دست می‌آید [16]:

$$[O] = 3.97 \times 10^5 T^{-2} [O_2]^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{31090}{T}\right) \quad (5)$$

$$[OH] = 2.129 \times 10^2 T^{-0.57} [O]^{\frac{1}{2}} [H_2O]^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{4595}{T}\right) \quad (6)$$

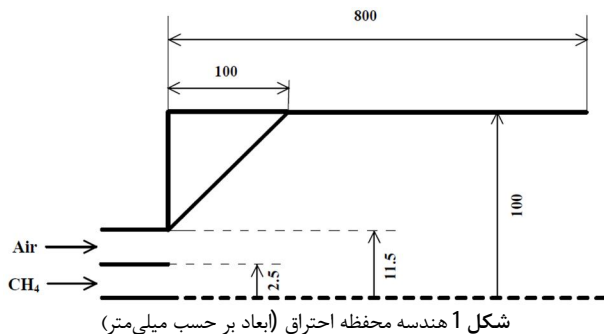
### 2-2- اکسید نیتروژن انگیخته

در سال 1971، فنیمر نشان داد که واکنش‌هایی غیر از واکنش‌های حرارتی در شعله در پیدایش اکسید نیتروژن مؤثرند و باعث تولید مقداری اکسید نیتروژن در منطقه شعله می‌شوند. این مکانیزم تشکیل اکسید نیتروژن معمولاً خیلی سریع شکل می‌گیرد و با واکنش‌های احتراق سوخت درگیری بیشتری نسبت به مکانیزم حرارتی دارد. تولید اکسید نیتروژن از طریق این مکانیزم، که معمولاً در مخلوط‌های غنی وجود دارد، منجر به تشکیل اکسید نیتروژن در منطقه شعله می‌شود [17]. این مکانیزم اکسید نیتروژن انگیخته<sup>1</sup> نامیده

مغشوش و سینتیک‌های شیمیایی است. صدها واکنش اولیه برای توصیف کامل واکنش در سیستم‌های احتراقی آرام مورد نیاز است. کوپل میدان جریان مغشوش با تعداد زیادی واکنش، در عمل امکان‌پذیر نیست؛ در نتیجه از واکنش‌های کلی یا مکانیزم‌های کاهش‌یافته در کدهای احتراقی جامع استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر پژوهشگران تلاش‌های فراوانی را برای درک جنبه‌های مختلف جریان واکنشی در محفظه احتراق توربین گاز انجام داده اند. در فرآیند احتراق، تحلیل عوامل موثر بر کاهش آلاینده اکسید نیتروژن به روش تجربی و حل عددی مورد توجه محققین قرار گرفته است. کامرون [5]، هیتور و وایت [6] و کوپر و لورندی [7] کارهای تجربی خود را به بررسی اثرات عوامل مهمی چون نسبت هوا به سوخت، فشار و دمای ورودی در محفظه احتراق برای سوخت‌های گاز و مایع اختصاص دادند. ایلباس [8] در سال 2005 تحقیقاتی در مورد تخمین اکسید نیتروژن در محفظه احتراق انجام داده است. در این تحقیق وی تأثیر مدل‌های تشعشع بر روی احتراق و میزان اکسید نیتروژن تولید شده را بررسی نمود و نشان داد که با اعمال مدل تشعشع در شبیه‌سازی اکسید نیتروژن نتایج قابل قبولی به دست می‌آید. ایلباس و همکارانش [9] در پژوهشی به بررسی تولید اکسید نیتروژن در احتراق‌های هیدروژنی به کمک حل عددی، به روش حجم محدود و با در نظر گرفتن تأثیرات تشعشع و مدل  $k-\epsilon$  در توربولانس، برای سه نوع سوخت پرداخته و در نهایت به این نتیجه رسیده‌اند که اولاً انتشار اکسید نیتروژن در احتراق هیدروژنی، به دلیل بالا بودن دما، به مراتب بیشتر از احتراق سوخت متان است و ثانیاً مخلوط کردن هیدروژن و متان منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در تولید اکسید نیتروژن می‌شود. تابع جماعت و مهدیزاده در پژوهشی در سال 1384 به بررسی کاهش تولید اکسید نیتروژن در محفظه احتراق با سوخت گازی به کمک پاشش آب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با پاشش بخار، اکسید نیتروژن تولیدی به طور چشمگیری کاهش یافته، اما نشر مونوکسید کربن افزایش می‌یابد [10]. محمدپورفرد و فلاح در سال 1390 به بررسی تجربی تأثیر دمای خنک‌کاری موتور و زمان پاشش سوخت بر کاهش آلاینده اکسید نیتروژن در موتورهای دیزلی پرداختند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که با تغییر در دمای خنک‌کاری موتور و پارامترهای زمان‌بندی پاشش سوخت آلاینده اکسید نیتروژن به طور متوسط تا حدود 17 درصد و مصرف سوخت نیز اندکی کاهش می‌یابد [11]. ابراهیمی و آقاجفی [12] در سال 2004 کاهش اکسید نیتروژن را به روش بازسوزش در بویلرهای نیروگاهی مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسیدند که با در نظر گرفتن 10% کل سوخت مصرفی به عنوان بازسوزش، اکسید نیتروژن تولیدی به میزان 33% کاهش می‌یابد. عامری و همکاران [13] در سال 2006 تحقیقی در مورد اثر سوخت گاز طبیعی و گازوییل بر میزان اکسید نیتروژن تولیدی و عملکرد توربین‌های گازی انجام دادند. همچنین، بازدیدی تهرانی و همکارش [14] در سال 2012 اثر تعداد و محل تثبیت کننده جت بر روی ویژگی‌های احتراق و انتشار اکسید نیتروژن در محفظه احتراق را مورد مطالعه قرار دادند.

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی عددی تولید و انتشار اکسیدهای نیتروژن ناشی از احتراق در یک محفظه احتراق متقارن مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا تأثیر سه پارامتر نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی و میزان هوادهی بر نرخ تولید آلاینده اکسید نیتروژن در محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، سهم تولید اکسید نیتروژن از دو مکانیزم حرارتی و انگیخته برای سه سوخت مختلف به صورت کمی مقایسه شده‌اند.



جدول 1 توابع و ضرایب معادلات حاکم در جریان واکنشی

معادله	$\Gamma_\phi$	$\phi$	$S_\phi$
پیوستگی	0	$l$	0
مومنتم	$\mu_{eff}$	$u_j$	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j}$
انرژی جنبشی آشفتنگی	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$k$	$G^* - \rho \epsilon$
انرژی اتلاف آشفتنگی	$\mu + \frac{\mu_\epsilon}{\sigma_k}$	$\epsilon$	$(C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k}$
کسر جرمی	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$\gamma_i$	$R_i$
واریانس کسر مخلوط	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$g$	$2 \frac{\mu_t}{\sigma_t} \left( \frac{\partial f}{\partial x_m} \right) \left( \frac{\partial f}{\partial x_m} \right) - C_g \rho g \frac{\epsilon}{k}$
انتالپی کل	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$h$	$-S^{**} \text{ rad}$

#### 4- هندسه و شرایط مرزی

مشخصات هندسی محفظه احتراق مورد نظر در شکل 1 نشان داده شده است. قطر محفظه احتراق 200 میلی‌متر و طول آن 800 میلی‌متر است. قطر داخلی مجرای ورود سوخت 5 میلی‌متر و قطر خارجی فضای حلقوی 200 میلی‌متر است.

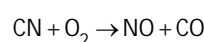
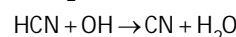
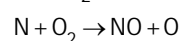
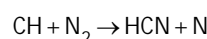
آزمایش‌ها در شرایط دما و فشار استاندارد انجام شده است. دبی جرمی گاز متان 0/1336 کیلوگرم بر ساعت و دبی جرمی هوا 2/33 کیلوگرم بر ساعت است و به صورت غیر پیش‌مخلوط وارد محفظه می‌شوند. مخلوط استوکیومتریک بوده و دمای ورود سوخت و هوا  $T=293/15$  کلوین است. به دلیل حل متقارن محوری، از نیمه بالایی محفظه احتراق برای شبکه‌بندی استفاده شده است. شبکه ایجاد شده شامل 32000 سلول است. اعتبارسنجی نتایج برای احتراق سوخت متان انجام شده است. با توجه به متقارن بودن شکل محفظه، نیمی از آن شبکه‌بندی شده و خط مرکزی، محور تقارن تعریف می‌شود. در ورود، دبی جرمی سوخت و هوا و در خروج، شرط مرزی فشار (فشار محیط) اعمال شده است. دیوار خارجی محفظه احتراق به صورت شرط مرزی دیواره در نظر گرفته می‌شود.

#### 5- حل عددی

معادلات حاکم شامل بقای جرم، مومنتم، اجزاء شیمیایی، آلایندگی و انرژی براساس روش حجم محدود حل شده است. به منظور دستیابی به حل مستقل از شبکه‌بندی، تعداد سلول‌های محاسباتی در سه حالت بررسی شده است. نتایج حاصل از 32000 شبکه مربعی سازمان یافته رضایت‌بخش بوده است و تغییر محسوسی نسبت به حالت‌های قبیل نشان نمی‌دهد. معیار همگرایی برای معادله انرژی خطای نسبی  $10^{-6}$  و برای سایر معادلات بقا  $10^{-4}$  تعریف شده است.

می‌شود. در این مکانیزم اکسید نیتروژن در اثر برخورد بین مولکول‌های نیتروژن و رادیکال‌های هیدروکربن تولید می‌شود. تشکیل اکسید نیتروژن از طریق این مکانیزم به تعداد اتم‌های کربن در واحد حجم وابسته است. با افزایش نسبت هم‌ارزی، غلظت رادیکال‌های آزاد کربن در ناحیه اول شعله افزایش یافته و در نتیجه میزان تولید اکسید نیتروژن از طریق این مکانیزم افزایش می‌یابد. این پدیده در شعله‌های سوخت غنی نمایان‌تر است [18].

مطالعات بعدی وی بیانگر این مطلب هستند که اکسید نیتروژن انگیزته در شعله‌های غنی هیدروکربنی مشاهده نشده است. عامل این مکانیزم توسط فنیمور رادیکال‌های هیدروکربنی معرفی شد [18]. با توجه به شکل‌گیری اکسید نیتروژن انگیزته در منطقه شعله و هم‌زمان بودن هر دو فرآیند (احتراق و تشکیل اکسید نیتروژن) واکنش‌های این مکانیزم به صورت روابط (7) تا (10) معرفی شده است [18]:



نرخ میزان اکسید نیتروژن انگیزته به واسطه این مکانیزم از رابطه (11) قابل محاسبه است:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = k_f [\text{CH}][\text{N}_2] \exp\left(\frac{-E_a}{R_u T}\right) \quad (11)$$

که در آن،  $k_f$  نرخ انجام واکنش در رابطه (7) است.

#### 3- معادلات حاکم

برای تخمین آلایندگی اکسید نیتروژن باید میدان جریان، دما و غلظت اجزای شیمیایی مشخص باشند. از این رو نیاز به حل معادلات حاکم بر فرآیندهای شیمیایی است. معادلات حاکم برای پیش‌بینی جریان واکنشی و مدل‌سازی آلایندگی اکسید نیتروژن شامل معادلات جرم، مومنتم، انرژی جنبشی آشفتنگی و اتلاف آن و کسرهای جرمی است. در حالت تراکم‌ناپذیر، پایا و تقارن محوری جریان معادلات فوق را می‌توان به شکل عمومی به فرم رابطه (12) نوشت:

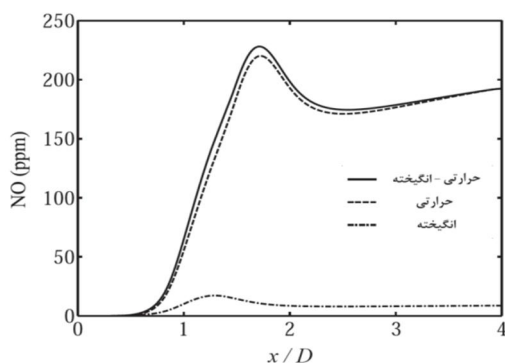
$$\nabla \cdot (\rho u \phi - \Gamma_\phi \nabla \phi) = S_\phi \quad (12)$$

$\phi$  نمایانگر متغیر اصلی در معادلات انتقال و  $S_\phi$  ترم چشمه است.  $\Gamma_\phi$  ضریب دیفیوژن مؤثر و جدول 1 خلاصه‌ای از متغیرها و ضرایب نفوذ و ترم چشمه را، که در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. برای محاسبه نرخ انجام واکنش از مدل استهلاک ادی استفاده شده است. همچنین از واکنش سه‌مرحله‌ای با هفت جزء واکنشی برای احتراق سوخت‌ها استفاده شده است [20].

برای حل معادله انتقال اکسید نیتروژن از یک معادله عمومی، که دارای تمام بخش‌های جاه‌جایی، پخشی، تولید و مصرف اکسید نیتروژن است، استفاده می‌شود. از این رو برای تخمین اکسید نیتروژن ناشی از مکانیزم حرارتی و انگیزته معادله (13) معتبر خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{\text{NO}}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{NO}}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{\text{NO}}) + S_{\text{NO}} \quad (14)$$

که در آن  $Y_{\text{NO}}$  کسر جرمی اکسید نیتروژن است. ترم چشمه  $S_{\text{NO}}$  با توجه به مکانیزم‌های مختلف اکسید نیتروژن تعیین خواهند شد [19].



شکل 6 بررسی سهم اکسید نیتروژن حرارتی و انگيخته روی محور در نسبت هم‌ارزی 0/7 برای سوخت پنتان

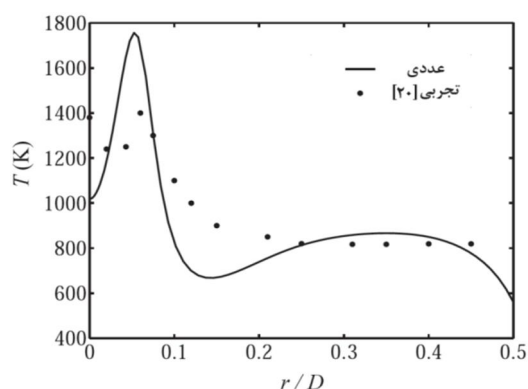
### 6- بحث پیرامون نتایج

شکل 2 توزیع شعاعی دمای محصولات احتراق در مقطع  $x=0/1$  را نشان می‌دهد. به جز نقطه مرکزی، نتایج حل عددی حاضر تطابق قابل قبولی با مقادیر تجربی موجود [20] دارد. اختلاف قابل ملاحظه 40 درصدی در نقطه مرکزی به علت خطای اندازه‌گیری ناشی از تشعشع شعله به نوک ترموکوپل است و مرجع [20] به این نکته به‌طور صریح اشاره کرده است. بیشترین اختلاف در منطقه تشکیل شعله حدود 28 درصد است. با دور شدن از این منطقه، اختلاف کمتر از 4 درصد می‌شود.

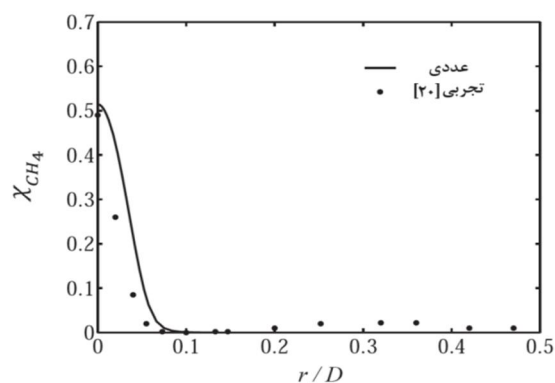
شکل 3 توزیع شعاعی کسر مولی گاز متان در مقطع  $x=0/1$  را نشان می‌دهد. نتایج حل عددی حاضر در مقایسه با مقادیر تجربی موجود رضایت‌بخش به‌نظر می‌رسد. مطابق شکل، با دور شدن از محور مرکزی و در ناحیه چرخشی جریان، کسر مولی گاز متان بسیار ناچیز است. علت این امر، رقیق بودن مخلوط در ناحیه مذکور و واکنش سریع ملکول‌های گاز متان است. پیش‌بینی میزان اکسید نیتروژن پس از اجرا و اتمام محاسبات احتراقی به کمک یک پس‌پردازنده، که از خروجی‌های محاسبات احتراق به‌عنوان ورودی استفاده می‌کند، انجام می‌شود. در این قسمت از انجام محاسبات، میزان اکسید نیتروژن حرارتی و اکسید نیتروژن انگيخته به‌طور جداگانه در یک نسبت هم‌ارزی برای سوخت متان و بار دیگر به‌صورت مجموع در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف برای سه سوخت متان، پروپان و پنتان اجرا شده و از محاسبه اکسید نیتروژن سوختی، به‌علت نبود نیتروژن در سوخت‌های متان، پروپان و پنتان، صرف‌نظر شده است. شکل 4 توزیع مقدار اکسید نیتروژن از دو مکانیزم حرارتی و انگيخته را نشان می‌دهد. مطابق شکل، سهم عمده تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مکانیزم حرارتی است و بیشترین مقدار آن در ناحیه دمابالا (ناحیه شعله) قرار دارد.

در شکل‌های 5 و 6، توزیع اکسید نیتروژن انگيخته و حرارتی بر روی محور برای دو سوخت پروپان و پنتان نشان داده شده است. ناحیه عمده اکسید نیتروژن انگيخته در فاصله یک تا دو برابر قطر محفظه است. مشخصه این ناحیه این است که در مجاورت آن درصد غلظت سوخت، نسبتاً قابل توجه بوده و در نتیجه امکان وجود رادیکال متیلدن<sup>1</sup> زیاد، و لذا میزان غلظت اکسید نیتروژن انگيخته محسوس است.

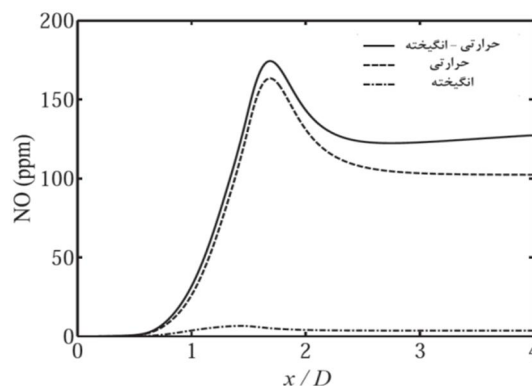
مطابق شکل‌های 5 و 6، برای سوخت‌های پروپان و پنتان در نسبت هم‌ارزی 0/7، سهم عمده اکسید نیتروژن مربوط به تشکیل این جزء از طریق مکانیزم حرارتی است. سهم تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مکانیزم انگيخته در مقایسه با اکسید نیتروژن حرارتی ناچیز است، اما قابل صرف‌نظر نیست. در



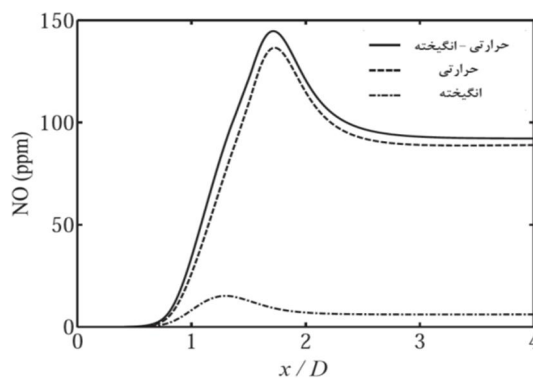
شکل 2 توزیع شعاعی دمای محصولات احتراق و مقایسه با داده‌های تجربی در مقطع  $x=0/1$



شکل 3 توزیع شعاعی کسر مولی متان در مقطع  $x=0/1$  و مقایسه با داده‌های تجربی



شکل 4 سهم اکسید نیتروژن حرارتی و انگيخته روی محور در نسبت هم‌ارزی 0/7 برای سوخت متان

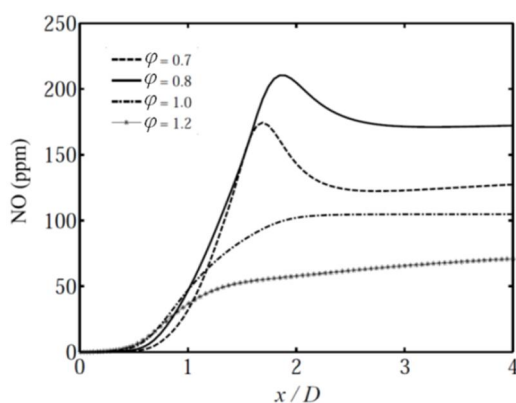


شکل 5 بررسی سهم اکسید نیتروژن حرارتی و انگيخته روی محور در نسبت هم‌ارزی 0/7 برای سوخت پروپان

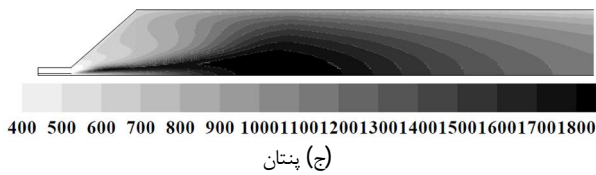
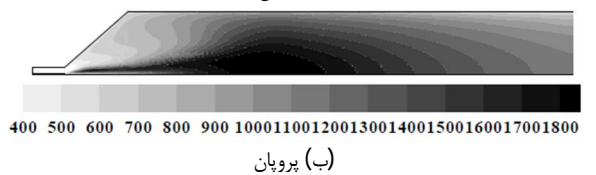
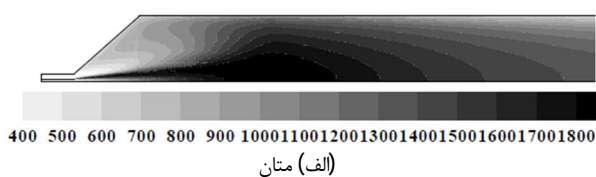
1- Methylidyne (CH)

در شکل‌های 10 و 11 به ترتیب دما و اکسید نیتروژن روی محور در نسبت هم‌ارزی 0/8 برای متان، پروپان و پنتان مقایسه شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که در محل بیشینه دما بیشینه اکسید نیتروژن روی داده است. با توجه به رابطه 4، تشکیل اکسید نیتروژن رابطه مستقیم با غلظت اکسیژن و نیتروژن دارد.

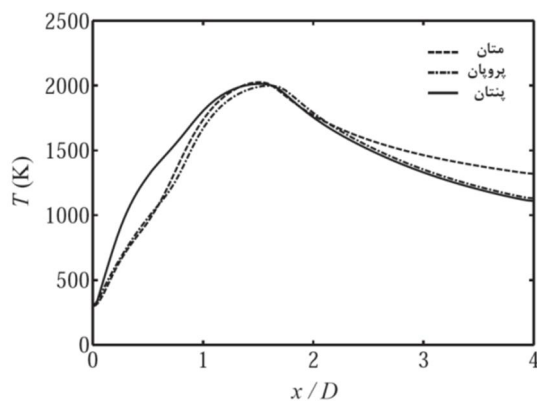
شکل‌های 12 و 13 نیز توزیع غلظت مولی اکسیژن و نیتروژن را روی محور برای سه سوخت نشان می‌دهد. در فواصل نزدیک، به علت عدم اختلاط مناسب سوخت و هوا، غلظت مولی اکسیژن بسیار ناچیز بوده و غلظت سوخت قابل توجه است.



شکل 8 توزیع اکسید نیتروژن روی محور در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی



شکل 9 کانتور دما در نسبت هم‌ارزی 1/1 برای سوخت‌های متان، پروپان و پنتان



شکل 10 مقایسه دما روی محور در نسبت هم‌ارزی 0/8 برای سوخت‌های متان، پروپان و پنتان

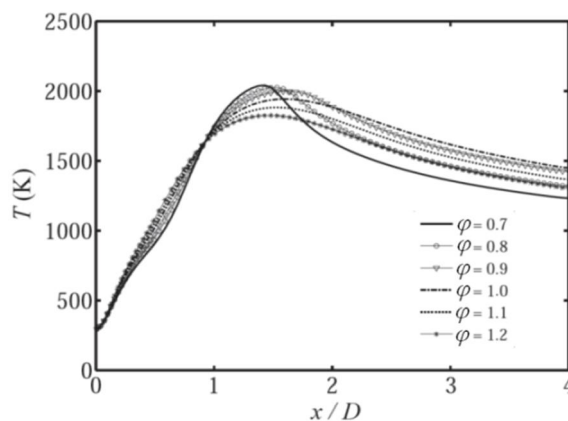
اثر اختلاط سوخت و هوا و نفوذ آن‌ها در ناحیه اولیه محفظه احتراق، غلظت هر دو نمونه جرمی ذکر شده کاهش می‌یابد. این اثر به خصوص در مورد اکسیژن بسیار محسوس است.

شکل 7 مربوط به توزیع دما روی محور در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بلافاصله بعد از اختلاط سوخت و هوا و شکل‌گیری احتراق، دما به شدت افزایش می‌یابد. سپس، با افزایش فاصله از مقطع ورودی، دما به تدریج و با نرخ کمی کاهش می‌یابد. در تمامی نسبت‌های هم‌ارزی بیشترین مقدار دما تقریباً در فاصله یک تا دو برابر قطر محفظه دیده می‌شود. دماها در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی خیلی نزدیک به هم هستند. بیشترین دما برای نسبت هم‌ارزی 0/7 و 0/8 و کمترین دما مربوط به نسبت هم‌ارزی 1/1 است.

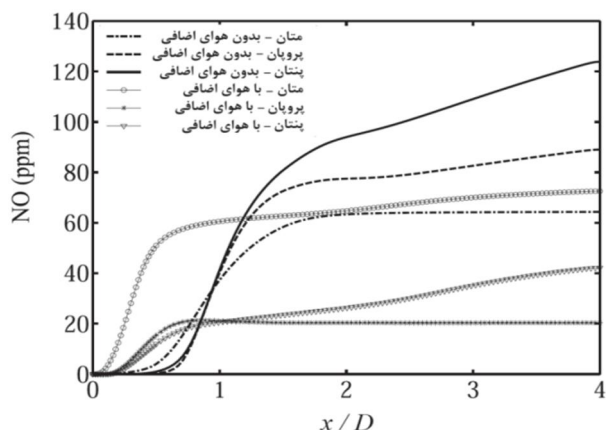
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، تولید اکسید نیتروژن رابطه مستقیم با دما دارد. شکل 8 مربوط به توزیع اکسید نیتروژن روی محور در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی است. در فواصل نزدیک (فاصله بی‌بعد کمتر از 1)، تولید اکسید نیتروژن وابستگی اندکی به نسبت هم‌ارزی دارد. با توجه به شکل 7، با افزایش فاصله و افزایش دما، میزان اکسید نیتروژن نیز افزایش می‌یابد. این افزایش تا نزدیکی‌های فاصله بی‌بعد 2 روی محور پیش رفته، سپس ثابت می‌ماند. با افزایش نسبت هم‌ارزی، به‌ویژه بیش از نسبت هم‌ارزی 1، تولید اکسید نیتروژن به شدت کاهش می‌یابد. کمترین مقدار اکسید نیتروژن روی محور مربوط به نسبت هم‌ارزی 1/2 است.

شکل 9 کانتورهای دمای محفظه را در نسبت هم‌ارزی 1/1 به ترتیب برای سوخت‌های متان، پروپان و پنتان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدای محفظه و در ناحیه اختلاط سوخت و هوا واکنش‌های احتراقی صورت گرفته و توده‌های سیال حاوی گازهای داغ حاصل از احتراق به سمت پایین دست حرکت می‌کند.

درون محفظه احتراق، به دلیل بالا بودن دمای محصولات احتراق، شرایط مناسبی برای تولید اکسید نیتروژن حرارتی فراهم می‌شود. اگر به رابطه 4 برای نرخ تولید اکسید نیتروژن حرارتی توجه شود، مشاهده می‌شود که نرخ تولید اکسید نیتروژن، علاوه بر وابستگی به دما، رابطه مستقیم با غلظت‌های اکسیژن و نیتروژن محصولات احتراق دارد. با توجه به این نکته، مشاهده می‌شود که در ناحیه مرکزی ابتدای محفظه دما بالاست، ولی به دلیل نبودن اکسیژن کافی در این ناحیه اکسید نیتروژن قابل توجهی ایجاد نشده است. اما در ناحیه پایین دست محفظه احتراق، که هم دمای بالا و هم اکسیژن و نیتروژن وجود دارد، مقدار قابل توجهی اکسید نیتروژن حرارتی تشکیل شده است و سپس توسط فرایند جابه‌جایی سیال به سمت خروجی گسترش یافته است.



شکل 7 توزیع دما روی محور در نسبت‌های مختلف هم‌ارزی برای متان



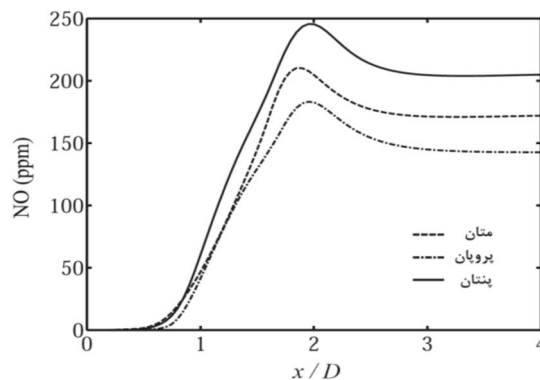
شکل 15 مقایسه اثر دهرصد هوادهی بر تولید اکسید نیتروژن بر روی محور در نسبت هم‌ارزی 1/1

با افزایش فاصله، اگرچه غلظت مولی اکسیژن افزایش می‌یابد، اما به واسطه انجام واکنش و مصرف اکسیژن، در مقایسه با غلظت مولی نیتروژن ناچیز است. از آنجا که نیتروژن در واکنش احتراق شرکت نمی‌کند، مطابق شکل 13، غلظت مولی آن فقط در نواحی بسیار نزدیک به مجرای سوخت ناچیز است. بیشترین غلظت مولی اکسیژن و نیتروژن مربوط به سوخت پنتان است. یکی از روش‌های کنترل تولید اکسید نیتروژن هوادهی در مجرای سوخت است. این عمل باعث اختلاط مناسب سوخت و هوا و همچنین یکنواختی توزیع دما در محفظه احتراق می‌شود. درصد هوادهی از رابطه (14) محاسبه شده است:

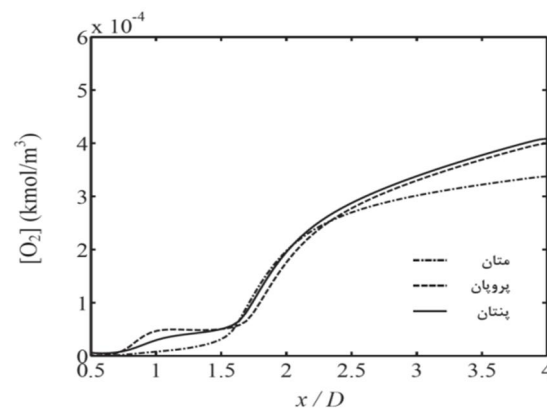
$$\text{درصد هوادهی} = \frac{1-\phi}{\phi} * 100 \quad (14)$$

شکل 14 مقایسه دما بر روی محور برای دو حالت بدون هوادهی و با افزایش ده درصدی هوادهی برای متان، پروپان و پنتان در نسبت هم‌ارزی 1/1 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اثر هوادهی، ناحیه دمابالا در جلوی مشعل کوتاه‌تر شده و بیشینه دما روی محور کاهش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل 15 مقایسه اکسید نیتروژن بر روی محور برای دو حالت بدون هوادهی و با افزایش ده درصدی هوادهی برای متان، پروپان و پنتان در نسبت هم‌ارزی 1/1 صورت گرفته است. میزان اکسید نیتروژن تولیدی در محفظه احتراق، ابتدا، با افزایش هوای اضافی افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش رادیکال‌های اکسیژن است. این روند تا درصد معینی از هوای اضافی ادامه می‌یابد، ولی در ادامه، به علت کاهش دما که نتیجه افزایش هوای اضافی است، میزان اکسید نیتروژن تولیدی کاهش پیدا خواهد کرد.

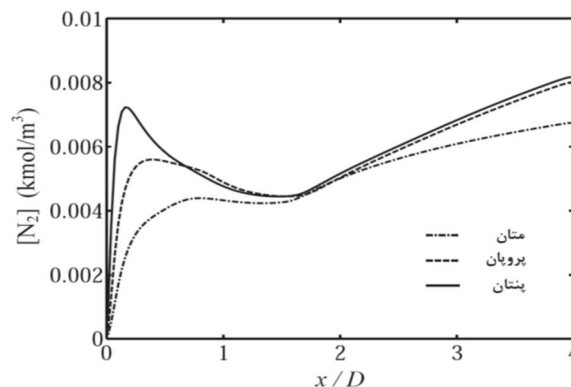
در ضمن، دمای حداکثر داخل محفظه، با افزایش هوای اضافی، کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر، به لحاظ محدودیت‌های متالورژی مواد موجود در توربین و حساسیت به دمای بالا، لازم است توجه ویژه‌ای به دمای خروجی از محفظه احتراق شود. ملاحظه می‌شود که با افزایش هوای اضافی، نه تنها ماکزیمم دما، بلکه متوسط دما در خروجی محفظه احتراق نیز کاهش پیدا می‌کند. شکل 16 اثر هوادهی بر دمای محفظه احتراق را نشان می‌دهد. مطابق شکل، ماکزیمم دما در ناحیه شعله برای سوخت متان 2000 و برای سوخت‌های پروپان و پنتان 1900 درجه سانتی‌گراد است. افزایش دما منجر به افزایش تولید اکسید نیتروژن در این ناحیه می‌شود. به همین علت، مطابق شکل 15، در حالت احتراق با هوای اضافی، بیشترین میزان تولید اکسید نیتروژن در ناحیه شعله برای متان سوخت مشاهده می‌شود.



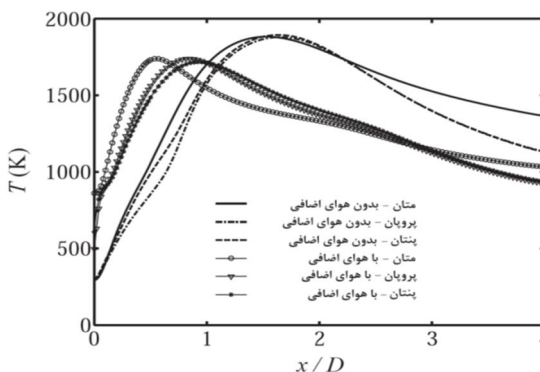
شکل 11 مقایسه اکسید نیتروژن روی محور در نسبت هم‌ارزی 0/8 برای سوخت‌های متان، پروپان و پنتان



شکل 12 مقایسه غلظت مولی اکسیژن روی محور در نسبت هم‌ارزی 0/8 برای سوخت‌های متان، پروپان و پنتان



شکل 13 مقایسه غلظت مولی نیتروژن روی محور در نسبت هم‌ارزی 0/8 برای سوخت‌های متان، پروپان و پنتان



شکل 14 مقایسه دما بر روی محور بدون هوادهی و با افزایش ده درصدی هوادهی برای متان پروپان و پنتان در نسبت هم‌ارزی 1/1

همچنین، میزان اکسید نیتروژن تولیدی در محفظه احتراق با افزایش هوای اضافی افزایش می‌یابد و این به علت افزایش رادیکال‌های اکسیژن است. این روند تا درصد معینی از هوای اضافی ادامه می‌یابد، ولی در ادامه، به علت کاهش دما که در نتیجه افزایش هوای اضافی است، میزان اکسید نیتروژن تولیدی کاهش پیدا خواهد کرد. در حالت بدون هوادهی بیشترین مقدار متوسط اکسید نیتروژن در دهانه خروجی مربوط به پنتان در نسبت هم‌ارزی 1 و کمترین مقدار مربوط به متان در نسبت هم‌ارزی 1/1 است. با ده درصد هوادهی بیشترین مقدار متوسط اکسید نیتروژن در دهانه خروجی مربوط به متان در نسبت هم‌ارزی 0/8 و کمترین مقدار مربوط به پنتان در نسبت هم‌ارزی 0/8 است.

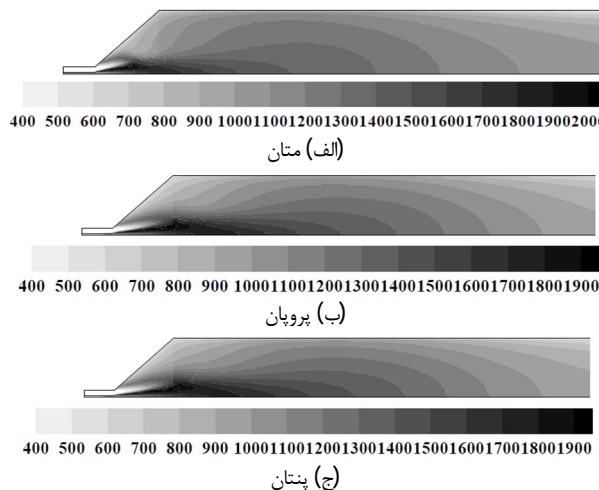
در حالت بدون هوادهی، بیشترین مقدار ماکزیمم دما در دهانه خروجی مربوط به متان در نسبت هم‌ارزی 0/8 است. با ده درصد هوادهی بیشترین مقدار ماکزیمم دما در دهانه خروجی مربوط به متان در نسبت هم‌ارزی 0/8 است. در حالت بدون هوادهی بیشترین مقدار متوسط دما در دهانه خروجی مربوط به متان در نسبت هم‌ارزی 1 است. با ده درصد هوادهی بیشترین مقدار متوسط دما در دهانه خروجی مربوط به متان در نسبت هم‌ارزی 0/8 است.

### 8- فهرست علائم و نشانه‌ها

$c_p$	گرمای ویژه ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$h$	آنتالپی ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
$K_{\text{eff}}$	ضریب هدایت حرارتی موثر ( $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$k$	انرژی جنبشی آشفتگی ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ )
$m$	کسر جرمی
$M$	وزن ملکولی ( $\text{kg.kmol}^{-1}$ )
$P$	فشار (Pa)
$r$	فاصله شعاعی (m)
$R$	ثابت جهانی گازها ( $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$T$	دما (K)
$u$	سرعت محوری ( $\text{ms}^{-1}$ )
$v$	سرعت شعاعی ( $\text{ms}^{-1}$ )
$r$	فاصله محوری (m)
$\mu$	لزجت ( $\text{Pa.s}$ )
$\varphi$	نسبت هم‌ارزی
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\chi$	کسر مولی

### 9- مراجع

- [1] S. R. Bell, M. Gupta, Extension of the lean operating limit for natural gas fuelling of a spark ignited engine using hydrogen blending, *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 123, pp. 23-48, 2003.
- [2] R. W. Schefer, D. M. Wicksal, A. K. Agarwal, Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner, *Proc. Combust. Inst.* 29, pp. 843-851, 2002.
- [3] S. C. Hill, L. D. Smoot, Modeling of nitrogen oxide formation and destruction on combustion system, *Prog. Energy combustion science*, Vol. 26, pp. 417-458, 2000.
- [4] C. T. Bowman, Control of Combustion Generated Nitrogen Oxide, *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 24, Issue 1, pp. 859-878, 1992.
- [5] C. D. Cameron, J. Brouwer, C. P. Wood, G. S. Samuelson, detailed characteristic of the velocity and thermal fields in a model ca combustor with wall jet injection, *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 111, pp. 31-35, 1989.



شکل 16 کانتور دما و اثر افزایش ده درصدی هوای اضافی در نسبت هم‌ارزی 1/1 برای سوخت‌های متان، پروپان و پنتان

جدول 2 مقادیر متوسط اکسید نیتروژن تولیدی در دهانه خروجی برای سوخت‌های

متان، پروپان و پنتان			
سوخت	نسبت هم‌ارزی	متوسط اکسید نیتروژن در دهانه خروجی بدون هوادهی (ppm)	متوسط اکسید نیتروژن در دهانه خروجی با هوادهی (ppm)
متان	$\varphi = 0/8$	169/8	103/1
	$\varphi = 1/0$	104/8	93/2
	$\varphi = 1/1$	64	72
پروپان	$\varphi = 0/8$	261/7	80/1
	$\varphi = 1/0$	180/6	95/4
	$\varphi = 1/1$	87	21
پنتان	$\varphi = 0/8$	203/6	17/6
	$\varphi = 1/0$	270/2	84/4
	$\varphi = 1/1$	118	41

در جدول 2 مقادیر ماکزیمم و متوسط اکسید نیتروژن تولیدی برای سوخت‌های متان، پروپان و پنتان در سه نسبت هم‌ارزی مختلف (مخلوط رقیق، استوکیومتری و غنی) برای دو حالت بدون هوادهی و ده درصد هوادهی نشان داده شده است.

### 7- نتیجه‌گیری

با استفاده از شبیه‌سازی عددی دوبعدی برای جریان در یک محفظه احتراق توربین گاز، اثر هوادهی در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف بر عملکرد محفظه احتراق و برخی پارامترهای مهم از جمله اکسیدهای نیتروژن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. برای محاسبه اکسید نیتروژن از مکانیزم‌های زلدوویچ و انگیکته استفاده شده است. به دلیل کاربرد وسیع، از مدل آشفتگی k-ε برای مدل‌سازی جریان آشفته واکنشی استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با مکانیزم انگیکته، سهم عمده تشکیل اکسید نیتروژن مربوط به مکانیزم حرارتی است. این حالت در تمامی نسبت‌های هم‌ارزی و برای هر سه سوخت مورد بررسی متان، اتان و پروپان صادق است.

هوادهی در مجرای سوخت منجر به کاهش طول شعله می‌شود.

- [13] M. Ameri, Influence of fuel on gas turbine production and performanc, *Iran 1st Conference on Combustion, Tarbiat Modares university*, 1384 (In Persian).
- [14] H. Zeinivand, F. B. Tehrani, Influence of stabilizer jets on combustion characteristics and NOx emission in a jet stabilized combustor, *Applied Energy*, Vol. 92, pp. 348–360, 2012.
- [15] V. Singh, W.E. Young, M. J. Ambrose, Formation and control of oxides of nitrogen emission frame gas turbine combustion systems, *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 94, pp. 271-278, 1972.
- [16] J. A. Miller, C. T. Bowman, Mechanism and modeling of Nitrogen Chemistry in combustion, *progress in Energy and combustion Science*, pp. 287- 388, 1989.
- [17] S. R. Turns, S. J. Mantel, *An Introduction to Combustion*, New York:McGraw Hill, 2000.
- [18] C. P. Fenimore, Formation of Nitric Oxide in premixed hydrocarbon flames, *13th Symp. (Int'l.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1971.
- [19] R.W. Bilger, Turbulent diffusion flame, *Annual Rev. of fluid mech*, Vol. 21, pp. 101-135, 1989.
- [20] M. Yaga, H. Endo, T. Yamamoto, H. Aoki, T. Miura, Modeling of eddy characteristic time in les for calculating turbulent diffusion flame, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2343-2349, 2002.
- [6] M. V. Heitor, J. H. Whitelaw, Velocity temperature and species characteristics of the flow in a gas turbine combustor, *Combustion and Flame*, Vol. 64, pp. 1–32, 1986.
- [7] C. S. Cooper, N. M. Laurendeau, Parametric study of NO production via quantitative laser-induced fluorescence in high-pressure, swirl stabilization spray flames, *Proc Combust Inst*, Vol. 28, pp. 287–293, 2000.
- [8] M. Ilbas, The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen–hydrocarbon combustion modeling, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, Issue 10, pp 1113-1126, 2005.
- [9] M. Ilbas, I. Yılmaz, Y. Kaplan, 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, Issue 10, August 2005, pp. 1139-1147.
- [10] S. Mahdizadeh, S. Tabe'jamaat, NOx Reduction Analysis in Fuel Gas Combustion Chamber using Water Injection, *Mechanic and airspace Journal of Imam Hossein university*, Vol. 1, No. 1, 1384 (In Persian).
- [11] M. Fallah, M. Mohammadpourfard, Experimental investigation of effects of engine cooling temperature, EGR and injection timing to reduce NOx emissions in the diesel engines, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 1-9, 1390. (In Persian)
- [12] [12] R. Ebrahimi, S. Agha Najafi, Reburn effective method for NOx reduction, *12<sup>th</sup> International Conference on Mechanical Engineering*, Tarbiat Modares university, 1383 (In Persian).