



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

موسی زکی^۱، مهران رجبی زرگرآبادی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی هواپیما، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱ rajabi@semnan.ac.ir

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 مدنی است. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی جریان آشفته و فرآیند احتراق به صورت دو بعدی در یک محفظه احتراق مدل توربین گاز انجام شده است. از مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ و فرض استیلاک ادی به ترتیب برای شبیه‌سازی جریان آشفته و نزدیک انجام واکنش احتراق استفاده شده است. همچنین، برای ارتباط مادلات سرعت- فشار الگوریتم سیمیل به کار گرفته شده است. مدل سازی و محاسبه میزان احتراق استفاده شده است. همچنین، برای ساخت مختلف متان، پروپان و پتان انجام شده است. همچنین، تأثیر نسبت هم- تولید اکسید نیتروژن از دو مکانیزم حرارتی و انگیخته برای سه ساخت مختلف متان، پروپان و پتان انجام شده است. همچنین، تأثیر نسبت هم- ارزی و هوادهی در مجرای سوخت بر میزان تولید اکسید نیتروژن مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که برای هر سه ساخت متان، پروپان و پتان 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.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۴ اذر ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۳ بهمن ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۵ مهر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

احتراق، هوادهی

اکسید نیتروژن

مکانیزم حرارتی

مکانیزم انگیخته

Numerical analysis of effects of primary aeration on NO_x production in a model gas turbine combustion chamber

Moosa Zaki¹, Mehran Rajabi-Zargarabadi^{2*}

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.

۱- مقدمه

سیانو، اکسید نیتروژن^۱، دی‌اکسید نیتروژن، اکسید نیتروس^۲ و آمین می‌شوند^[۳]. این آلاینده‌های نیتروژنی واستگی زیادی به دما و نسبت همارزی در ناحیه احتراق دارند. بیش از ۹۰ 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 واسته می‌تواند تغییر کند^[۴]. فرآیندهای مربوط به تشکیل و کاهش اکسید نیتروژن بسیار پیچیده بوده و مدل سازی جامع آن‌ها در سیستم‌های احتراقی نیازمند شبیه‌سازی دینامیک سیال

احتراق هیدرولوکرینی منجر به تولید آلاینده‌های مخرب و اثربدار بر محیط زیست، سلامت بشر و در نهایت گرم شدن کره زمین می‌شود^[۱]. از میان این آلاینده‌ها اکسیدهای نیتروژن را می‌توان به عنوان یک آلاینده موثر بر تخریب محیط زیست و لایه ازن نام برد^[۲]. یکی از نگرانی‌های محققان و پژوهشگران در زمینه احتراق و انرژی، به خصوص در کشورهای صنعتی، به کارگیری 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_x 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 سیله مجموعه‌ای از واکنش‌های شیمیایی با دمای بالا، که معروف به مکانیزم زلدوبیچ 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 واپسگی شدید این مکانیزم به درجه حرارت می‌شود. واکنش دوم دارای ارزی فعال‌سازی بالایی است و عامل محدود کننده نرخ واکنش در مکانیزم زلدوبیچ 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) بدست می‌آید:

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

که k_r و k_f 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) بدست می‌آید [16]:

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

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

2-2- اکسید نیتروژن انگیخته

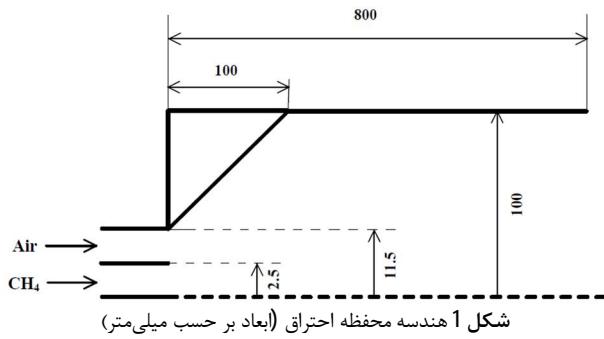
در سال 1971، فنیمور نشان داد که واکنش‌هایی غیر از واکنش‌های حرارتی در شعله در پیدایش اکسید نیتروژن مؤثrend و باعث تولید مقداری اکسید نیتروژن در منطقه شعله می‌شوند. این مکانیزم تشکیل اکسید نیتروژن معمولاً خیلی سریع شکل می‌گیرد و با واکنش‌های احتراق سوخت در گیری بیشتری نسبت به مکانیزم حرارتی دارد. تولید اکسید نیتروژن از طریق این مکانیزم، که عموماً در مخلوط‌های غنی وجود دارد، منجر به تشکیل اکسید نیتروژن در منطقه شعله می‌شود [17]. این مکانیزم اکسید نیتروژن انگیخته^۱ نامیده

مغشوش و شبیه‌سازی 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 وایت [6] و کوبر و لورنדי [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. ایلیاس [8] در سال 2005 تحقیقاتی در مورد تخمین اکسید نیتروژن در محفظه احتراق انجام داده است. در این تحقیق وی تأثیر مدل‌های تشبع بر روی احتراق و میزان اکسید نیتروژن تولید شده را بررسی نمود و نشان داد که با اعمال مدل تشبع در شبیه‌سازی اکسید نیتروژن نتایج قابل قبولی به دست می‌آید. ایلیاس و همکارانش [9] در پژوهشی به بررسی تولید اکسید نیتروژن در احتراق‌های هیدروژنی به کمک حل عددی، به روش حجم محدود و با درنظر گرفتن تأثیرات تشبع و مدل 4-K در توربولانس، برای سه نوع سوخت پرداخته و در نهایت به این نتیجه رسیده‌اند که اولاً انتشار اکسید نیتروژن در احتراق هیدروژنی، بدليل 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 آقانجفی [12] در سال 2004 کاهش اکسید نیتروژن را به روش بازسوزش در بویله‌های نیروگاهی مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسیدند که با درنظر 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 گازویل بر میزان اکسید نیتروژن تولیدی و عملکرد توربین‌های گازی انجام دادند. همچنین، بازدیدی تهرانی و همکارش [14] در سال 2012 اثر تعداد و محل ثبتیت 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.

1- Prompt Nox



جدول 1 توابع و ضرایب معادلات حاکم در جریان واکنشی

S_φ	Γ_φ	φ	معادله
0	0	1	پیوستگی
$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i}$	μ_{eff}	U_i	مومنتوم
$G^* - \rho \varepsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	k	انرژی جنبشی آشفتگی
$(C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$	$\mu + \frac{\mu_\varepsilon}{\sigma_k}$	ε	انرژی اتلاف آشفتگی
R_i	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	γ_i	کسر جرمی
$2 \frac{\mu_t}{\sigma_t} \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \right) - C_g \rho g \frac{\varepsilon}{k}$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	g	واریانس کسر مخلوط
$-S_{\text{rad}}^{**}$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	h	انتالپی کل

4- هندسه و شرایط مزدی

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

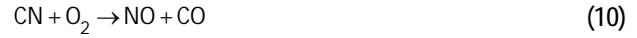
آزمایش‌ها در شرایط دما و فشار استاندارد انجام شده است. دبی جرمی گاز مтан 0/1336 کیلوگرم بر ساعت و دبی جرمی هوا 2/33 کیلوگرم بر ساعت است و به صورت غیر پیش‌مخلوط وارد محفظه می‌شوند. مخلوط استوکیومتریک بوده و دمای ورود سوخت و هوا $T=293/15$ کلوین است. به دلیل حل متقارن محوری، از نیمه بالایی محفظه احتراق برای شبکه‌بندی استفاده شده است. شبکه ایجاد شده شامل 32000 سلول است. اعتبارسنجی نتایج برای احتراق سوخت متن 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 مزدی فشار (فشار محیط) اعمال شده است. دیوار خارجی محفظه احتراق به صورت شرط مزدی دیواره درنظر گرفته می‌شود.

5- حل عددی

معادلات حاکم شامل بقای جرم، مومنتوم، اجزاء شیمیایی، آلیندگی 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 قبل 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 ازاد 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 نمایان تر است [18].

مطالعات بعدی وی بیانگر این مطلب هستند که اکسید نیتروژن انگیخته در شعله‌های غی هیدروکربنی مشاهده نشده است. عامل این مکانیزم توسط فنیمور رادیکال‌های هیدروکربنی معرفی شد [18]. با توجه به شکل گیری اکسید نیتروژن انگیخته 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 انگیخته 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 آلینده اکسید نیتروژن باید میدان جریان، دما و غلظت اجزای شیمیایی مشخص باشند. از این رو نیاز به حل معادلات حاکم بر فرآیندهای آلینده اکسید نیتروژن شامل معادلات جرم، مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی 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:

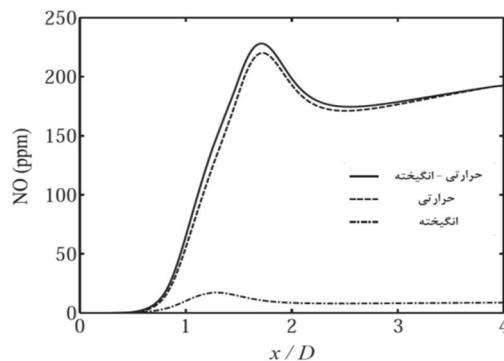
$$\nabla \cdot (\rho u \varphi - \Gamma_\varphi \nabla \varphi) = S_\varphi \quad (12)$$

φ نمایانگر متغیر اصلی در معادلات انتقال و S_φ ترم چشممه است. Γ_φ ضریب دیفیوژن مؤثر و جدول 1 خلاصه‌ای از متغیرها و ضرایب نفوذ و ترم چشممه 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 سه مرحله‌ای با هفت جزء واکنشی برای احتراق سوخت‌ها استفاده شده است [20].

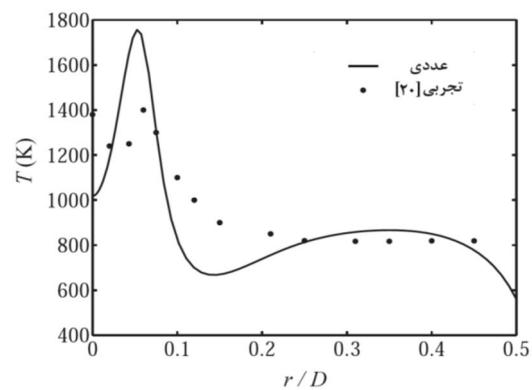
برای حل معادله انتقال اکسید نیتروژن از یک معادله عمومی، که دارای تمام پخش‌های جایه‌جایی، پخشی، تولید و مصرف اکسید نیتروژن است، استفاده می‌شود. از این رو برای تخمین اکسید نیتروژن ناشی از مکانیزم حرارتی و انگیخته معادله (13) معتبر خواهد بود:

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

که در آن Y_{NO} کسر جرمی اکسید نیتروژن است. ترم چشممه S_{NO} با توجه به مکانیزم‌های مختلف اکسید نیتروژن تعیین خواهد شد [19].



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

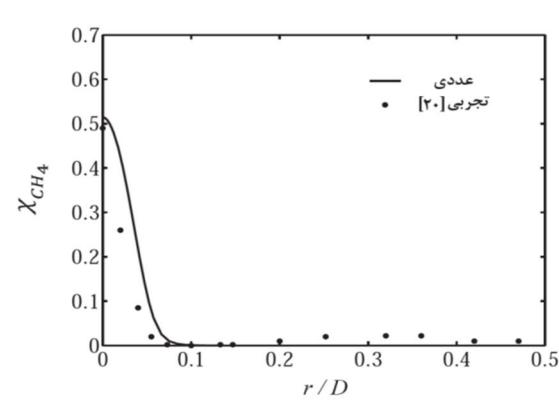


شکل 2 توزیع شعاعی دمای محصولات احتراق و مقایسه با داده‌های تجربی در مقطع $x=0/1$

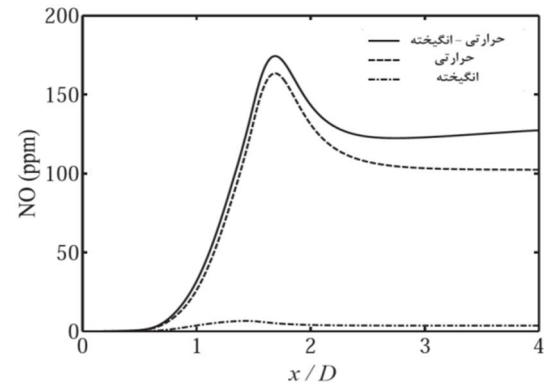
6- بحث پیرامون نتایج

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 بهعلت خطای اندازه‌گیری ناشی از تشعشع شعله به نوک ترموموکوپیل 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.

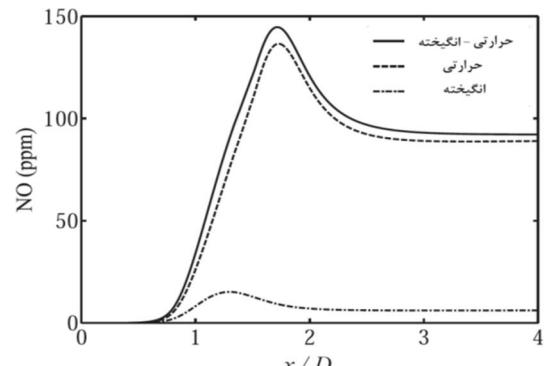
شکل 3 توزیع شعاعی کسر مولی گاز متان در مقطع $x=0/1$ را نشان می‌دهد. نتایج حل عددی حاضر در مقایسه با مقادیر تجربی موجود رضایت‌بخش بهنظر می‌رسد. مطابق شکل، با دور شدن از محور مرکزی و در ناحیه چرخشی جریان، کسر مولی گاز متان سیار ناچیز است. علت این امر، رقیق بودن مخلوط در ناحیه مذکور و واکنش سریع ملکول‌های 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 انگیخته بهطور جداگانه در یک نسبت همارزی مختلف 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 انگیخته را نشان می‌دهد. مطابق شکل، سهم عمدۀ تشکیل اکسید نیتروژن از طریق مکانیزم حرارتی است و بیشترین مقدار آن در ناحیه دمابالا (ناحیه شعله) قرار دارد.



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



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



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

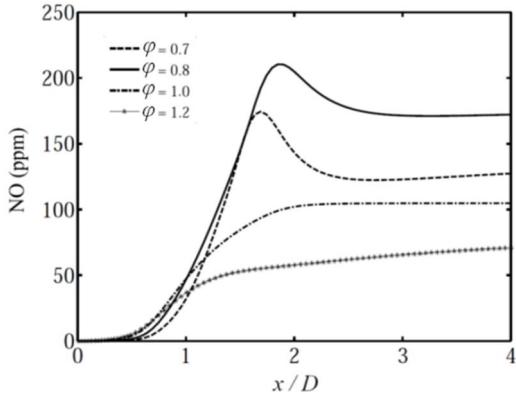
در شکل‌های 5 و 6، توزیع اکسید نیتروژن انگیخته و حرارتی بر روی محور برای دو سوخت پروپان و پنتان نشان داده شده است. ناحیه عمدۀ اکسید نیتروژن انگیخته در فاصله یک تا دو برابر قطر محفظه است. مشخصه این ناحیه این است که در مجاورت آن درصد غلظت سوخت، نسبتاً قابل توجه بوده و در نتیجه امکان وجود رادیکال متنلیدن¹ زیاد، ولذا میزان غلظت اکسید نیتروژن انگیخته محسوس است.

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

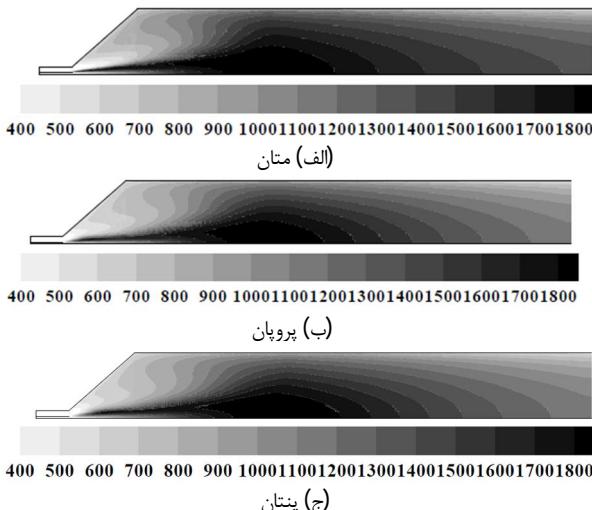
1- Methylidyne (CH)

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 ۴، تشکیل اکسید نیتروژن رابطه مستقیم با غلظت اکسیژن و نیتروژن دارد.

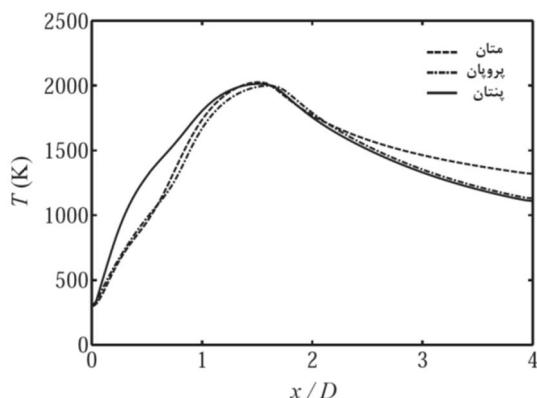
شکل‌های 12 و 13 نیز توزیع غلظت مولی اکسیژن و نیتروژن را روی محور برای سه سوخت نشان می‌دهد. در فواصل نزدیک، به علت عدم اختلاط مناسب سوخت و هوا، غلظت مولی اکسیژن بسیار ناچیز بوده و غلظت سوخت قابل توجه است.



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

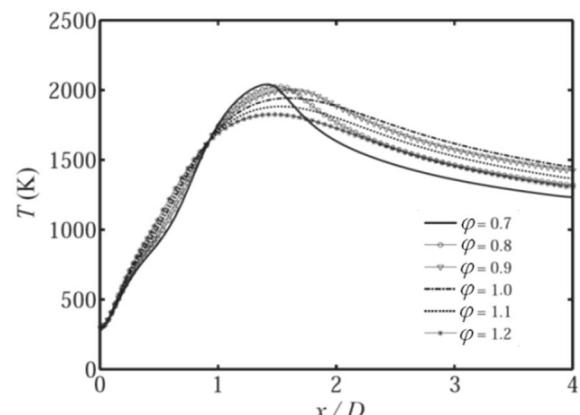
اثر اختلاط سوخت و هوا و نفوذ آن‌ها در ناحیه اولیه محفظه احتراق، غلظت هر دو نمونه جرمی ذکر شده کاهش می‌باید. این اثر به خصوص در مورد اکسیژن بسیار محسوس است.

شکل 7 مربوط به توزیع دما روی محور در نسبت‌های مختلف همارزی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بالاً فاصله بعد از اختلاط سوخت و هوا و شکل‌گیری احتراق، دما بهشت افزایش می‌باید. سپس، با افزایش فاصله از مقطع ورودی، دما بهترین مقدار دما تقریباً در فاصله یک تا دو برابر قطر محفظه دیده می‌شود. دمایا در نسبت‌های مختلف همارزی خیلی نزدیک به هم هستند. بیشترین دما برای نسبت همارزی 0/8 و کمترین دما مربوط به نسبت همارزی 1/1 است.

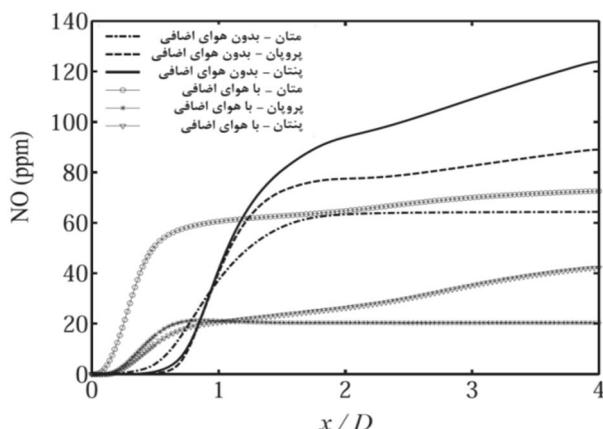
همان‌طور که قبل اشاره شد، تولید اکسید نیتروژن رابطه مستقیم با دما دارد. شکل 8 مربوط به توزیع اکسید نیتروژن روی محور در نسبت‌های مختلف همارزی است. در فواصل نزدیک (فاصله بی بعد کمتر از 1)، تولید اکسید نیتروژن وابستگی اندکی به نسبت همارزی دارد. با توجه به شکل 7، با افزایش فاصله و افزایش دما، میزان اکسید نیتروژن نیز افزایش می‌باید. این افزایش تا نزدیکی‌های فاصله بی بعد 2 روی محور پیش رفته، سپس ثابت می‌ماند. با افزایش نسبت همارزی، به ویژه بیش از نسبت همارزی 1، تولید اکسید نیتروژن بهشت کاهش می‌باید. 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 به‌سمت پایین دست حرکت می‌کند.

دون محفظه احتراق، به دلیل بالا بودن دمای محصولات احتراق، شرایط مناسبی برای تولید اکسید نیتروژن حرارتی فراهم می‌شود. اگر به رابطه ۴ 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 جایه‌جایی سیال به سمت خروجی گسترش یافته است.



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



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

با افزایش فاصله، اگرچه غلظت مولی اکسیژن افزایش می‌یابد، اما بهواسطه 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:

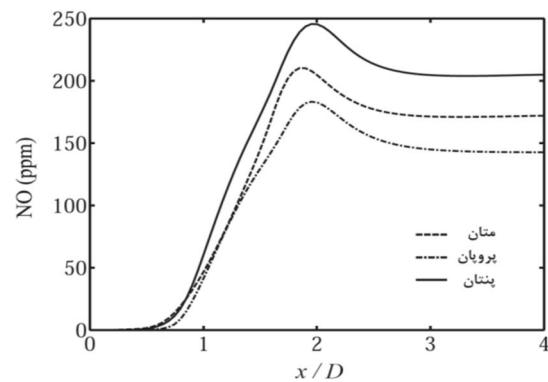
$$\frac{1-\varphi}{\varphi} \times 100 = \text{درصد هوادهی} \quad (14)$$

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.

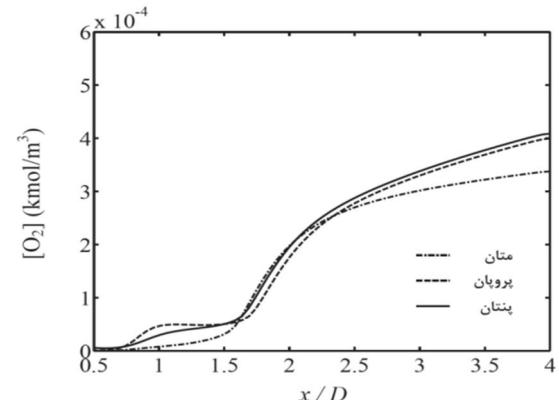
همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل 15 مقایسه اکسید نیتروژن بر روی محور برای دو حالت بدون هوادهی و با افزایش دهدارصی هوادهی برای متان، پروپان و پنتان در نسبت همارزی 1/1 صورت گرفته است.

میزان اکسید نیتروژن تولیدی در محفظه احتراق، ابتدا، با افزایش هوا اضافی افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش رادیکال‌های اکسیژن است. این روند تا درصد معینی از هوا اضافی ادامه می‌یابد، ولی در ادامه، بهعلت کاهش دما که نتیجه افزایش هوا اضافی است، میزان اکسید نیتروژن تولیدی کاهش پیدا خواهد کرد.

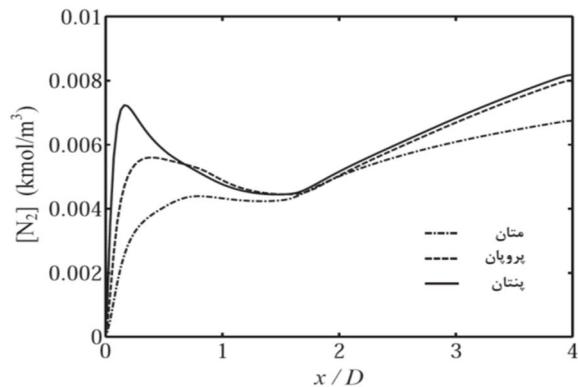
در ضمن، دمای حداکثر داخل محفظه، با افزایش هوا اضافی، کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر، به لحاظ محدودیت‌های متالورژی مواد موجود در توربین و حساسیت به دمای بالا، لازم است توجه ویژه‌ای به دمای خروجی از محفظه احتراق شود. ملاحظه می‌شود که با افزایش هوا اضافی، نه تنها ماکریزم دما، بلکه متوسط دما در خروجی محفظه احتراق نیز کاهش پیدا می‌کند. شکل 16 اثر هوادهی بر دمای محفظه احتراق را نشان می‌دهد. - مطابق شکل، ماکریزم 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 هوا اضافی، بیشترین میزان تولید اکسید نیتروژن در ناحیه شعله برای متan سوخت مشاهده می‌شود.



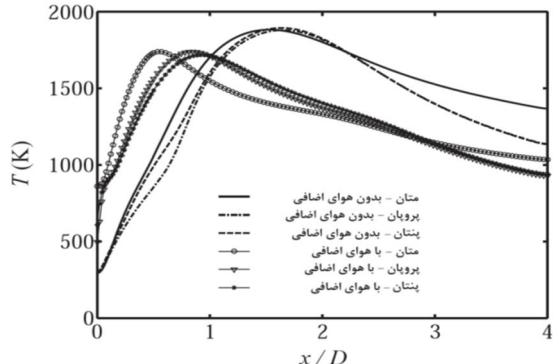
شکل 11 مقایسه اکسید نیتروژن روی محور در نسبت همارزی 0/8 برای سوخت‌های متان، پروپان و پنتان



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 دهدارصی هوادهی برای متان، پروپان و پنتان در نسبت همارزی 1/1

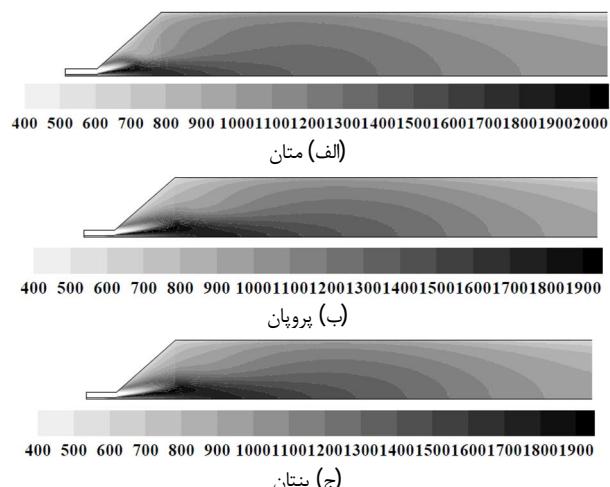
همچنین، میزان اکسید نیتروژن تولیدی در محفظه احتراق با افزایش هوای اضافی افزایش می‌یابد و این به علت افزایش رادیکال‌های اکسیژن است. این روند تا درصد معینی از هوای اضافی ادامه می‌یابد، ولی در ادامه، به علت کاهش دما که در نتیجه افزایش هوای اضافی است، میزان اکسید نیتروژن تولیدی کاهش پیدا خواهد کرد. در حالت بدون هوادهی بیشترین مقدار متوسط اکسید نیتروژن در دهانه خروجی مربوط به پنتان در نسبت هم‌ارزی ۱ 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 پروپان در نسبت هم‌ارزی $0/8$ و کمترین مقدار مربوط به پنتان در نسبت هم‌ارزی $0/8$ است.

در حالت بدون هوادهی، بیشترین مقدار ماکریزم دما در دهانه خروجی مربوط به متان در نسبت هم‌ارزی $0/8$ است. با ده درصد هوادهی بیشترین مقدار ماکریزم 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 ۱ است. با ده درصد هوادهی بیشترین مقدار متوسط دما در دهانه خروجی مربوط به متان در نسبت هم‌ارزی $0/8$ است.

8- فهرست علایم و نشانه‌ها	
گرمای ویژه (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	c_p
آنالپی (J kg ⁻¹)	h
ضریب هدایت حرارتی موثر (W m ⁻¹ K ⁻¹)	K_{eff}
انرژی جنبشی آشفتگی (m ² s ⁻²)	k
کسر جرمی	m
وزن ملکولی (kg.kmol ⁻¹)	M
فشار (Pa)	P
فاصله شعاعی (m)	r
ثابت جهانی گازها (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	R
دما (K)	T
سرعت محوری (ms ⁻¹)	u
سرعت شعاعی (ms ⁻¹)	v
فاصله محوری (m)	r
لزجت (Pa.s)	μ
نسبت هم‌ارزی	φ
چگالی (kgm ⁻³)	ρ
کسر مولی	X

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

جدول ۲ مقادیر متوسط اکسید نیتروژن تولیدی در دهانه خروجی برای سوخت‌های متan، پروپان و پنتان

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

در جدول ۲ مقادیر ماکریزم 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 زلدویچ و انگیخته استفاده شده است. بدلیل کاربرد وسیع، از مدل آشفتگی $e-k$ برای مدل‌سازی جریان آشفته و اکتشافی استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با مکانیزم انگیخته، سهم عده 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 performance, *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 from 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. İlbas, 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. İlbas, I. Yılmaz, Y. Kaplan, Investigations of hydrogen and hydrogen-hydrocarbon composite fuel combustion and NO_x emission characteristics in a model combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, Issue 10, August 2005, pp. 1139-1147.
- [10] S. Mahdizadeh, S. Tabatabaei, NO_x Reduction Analysis in Fuel Gas Combustion Chamber using Water Injection, *Mechanic and aerospace 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 NO_x emissions in the diesel engines, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 1-9, 1390. (In Persian)
- [12] R. Ebrahimi, S. Agha Najafi, Reburn effective method for NO_x reduction, *12th International Conference on Mechanical Engineering, Tarbiat Modares university*, 1383 (In Persian).