

آنالیز کاهش تولید NO_x در محفظه احتراق با سوخت گازی به کمک پاشش آب

ناصر سراج مهدیزاده^۱، صادق تابع جماعت^۲ و مستانه یاشینی^۳
دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

امروزه، تلاش‌های زیادی در جهت کاهش نثر NO_x توربین‌های گازی صورت می‌گیرد. نثر NO_x به شدت به دمای شعله بستگی دارد. تزریق آب یا بخار دمای پیک را کاهش می‌دهد و به دنبال آن نثر NO_x هم کم می‌شود. در این مقاله، بعد از مدل‌سازی محفظه احتراق موردنظر، بخار با نسبت‌های بخار به سوخت ۰/۵ و ۱ به محفظه پاشیده شده تا اثر آن روی کاهش نثر NO_x بررسی شود. از نرم‌افزار فلونت (FLUENT) برای حل میدان جریان استفاده شده است. با پاشش بخار مشاهده شده که NO_x به طور چشمگیری کاهش یافته، اما نثر CO افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: محفظه احتراق، NO_x ، تحلیل جریان، پاشش بخار یا آب

NOx Reduction Analysis in Fuel Gas Combustion Chamber Using Water Injection

Nasser Seraj Mehdizadeh, Sadegh Tabe Jamaat, Mastaneh Yashini
Aerospace Eng. Department, Amirkabir Univ. of Technology

ABSTRACT

Nowadays, a great deal of efforts are being carried out to reduce NO_x emission in gas turbines. NO_x emission depends closely on the flame temperature. Water or steam injection reduces the peak temperature and NO_x emission. In this paper, after modeling the combustion chamber, steam, with steam to fuel ratios of 0.5 and 1, is injected into the chamber and its effect on the NO_x emission reduction is studied. The FLUENT software is used for solving the related reactive flow. It is concluded that, NO_x emission decreases considerably, but CO emission increases.

Key Words: Combustion Chamber, NO_x , Flow Analysis, Steam or Water Injection

۱- استادیار: seraj@aut.ac.ir

مقدمه

از زمان شروع به کار اولین توربین گاز، تلاش در جهت کاهش نشر آلاینده آن آغاز شده و روش‌های زیادی تاکنون ابداع شده است. یکی از این روش‌ها پاشش آب یا بخار به محفظه احتراق است، که سالهای زیادی است از آن استفاده می‌شود. شواهد نشان داده است، که مقدار کاهش NO_x نسبت به جرم آب یا بخار تزریق شده به جرم سوخت بستگی زیادی دارد. این مسئله توسط شاو (Shaw) [۱]، اشتر (Schetter) [۲] نشان داده شده است. لویبر (Liever) [۳] با استفاده از تحلیل CFD کاهش NO_x را با استفاده از پاشش آب بررسی کرده و نشان داده است، که با افزایش پاشش آب یا بخار، NO_x را تا ۹۴ درصد می‌توان کاهش داد، ولی نشر CO به شدت افزایش می‌یابد.

در NO_x محفظه احتراق توربین گاز با استفاده از روش NO_x سوختی و NO_x حرارتی تشکیل می‌شود. NO_x سوختی زمانی که نیتروژن موجود در سوخت با اکسیژن واکنش می‌دهد، تشکیل می‌شود. NO_x سوختی را می‌توان با کاهش مقدار نیتروژن موجود در سوخت (استفاده از سوخت‌های حاوی نیتروژن کم، مانند گاز طبیعی) یا با کاهش اکسیژن در دسترس در ناحیه احتراقی کنترل کرد. NO_x حرارتی هم زمانی که نیتروژن موجود در هوا با اکسیژن واکنش می‌دهد (در نواحی دما بالا) تشکیل می‌شود، که با کاهش اکسیژن موجود در ناحیه احتراقی یا کاهش دمای ناحیه احتراقی کاهش می‌یابد. با پاشش آب یا بخار به محفظه احتراق، آب همانند چاه حرارتی عمل می‌کند و با جذب گرمای ناحیه واکنش، دما را کاهش می‌دهد. با کاهش دما نشر NO_x کم می‌شود.

در این مطالعه، به محفظه احتراق مدل شده، بخار تزریق می‌شود. بخار با نسبت‌های بخار به سوخت ۰/۵ و ۱ وارد محفظه می‌شود، تا اثر پاشش بخار بر کاهش NO_x با مقایسه حالت‌های بدون پاشش بخار و با پاشش بخار بررسی شود.

معادلات حاکم بر جریان

به منظور تحلیل عددی مدل موردنظر، نیاز به حل معادلات متوسط زمانی ممتنم، پیوستگی، انرژی و حالت است [۴]:

پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

ممتنم:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{\rho u_i' u_j'} \right)$$

وجود ترم‌های آشفتگی در معادلات نیاز به مدل‌سازی آشفتگی جریان را آشکار می‌سازد. این تنش‌ها توسط مدل‌های مختلف آشفتگی مدل می‌شوند. انرژی:

$$u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{u_i' T'} \right) \quad (3)$$

معادله حالت گاز کامل هم جزء معادلات موثر در تحلیل عددی است که ارتباط بین چگالی و دمای گاز را می‌دهد: معادله حالت:

$$P = \rho RT \quad (4)$$

به منظور بستن معادلات ناوبر - استوکس، مدل توربولانس مناسب نیاز است، که در این تحقیق از مدل $\kappa - \epsilon$ ، الگوریتم RNG استفاده شده است، که به شکل زیر ارائه می‌شود [۵]:

انرژی جنبشی آشفتگی:

$$\rho u_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = T_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\kappa \mu_{eff} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

نرخ استهلاک:

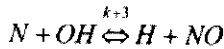
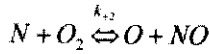
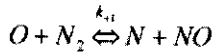
$$\rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - c_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_T$$

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$



y_{NO} نسبت جرمی در فاز گازی است. S_{NO} هم ترم چشمه (source term) است، که برای مکانیزم‌های مختلف تشکیل NO_x محاسبه می‌شود. نرخ تشکیل NO_x با استفاده از واکنش‌های زلدویچ (Zeldovich) محاسبه می‌شود:



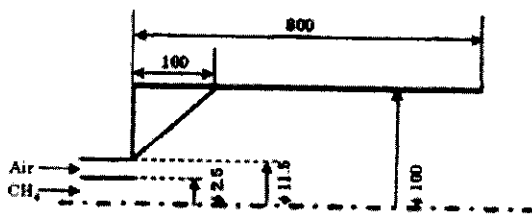
با فرض اینکه نرخ مصرف اتم‌های آزاد نیتروژن مساوی نرخ تولید آن است، غلظت NO از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \frac{(1 - \frac{k_{-1}k_2[NO]^2}{k_1[N_2]k_2[O_2]})}{1 + \frac{k_{-1}[NO]}{(k_2[O_2] + k_3[OH])}} \quad (9)$$

تنها به غلظت O و OH نیاز است تا غلظت NO بدست آید. فلوننت به چند روش غلظت این اجزاء را به دست می‌آورد. برای مطالعه بیشتر به مرجع [۷] رجوع شود.

هندسه و شرایط مسئله

شکل هندسی محفظه احتراق موردنظر در شکل (۱) نشان داده شده است. طول محفظه 0.8 متر و قطر آن 0.2 متر است. قطر مجرای ورودی سوخت 0.005 متر است. هوا هم از مجرای با قطر خارجی 0.115 متر و قطر داخلی 0.005 وارد محفظه می‌شود. در ساختن شبکه برای تحلیل جریان، از نرم‌افزار گمبیت (Gambit) نسخه ۱.۱.۲ استفاده شده است.



شکل ۱- شکل هندسی محفظه احتراق

$$c_{e1}=1.42 \quad c_{e2}=1.68 \quad c_{\mu}=0.0845 \quad \alpha_x=\alpha_g=1.39$$

$$c_{\epsilon 1}^* = c_{\epsilon 1} - \frac{\eta(1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta\eta^3}$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{\kappa}{\epsilon}$$

$$\eta_0 = 4.377$$

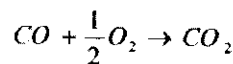
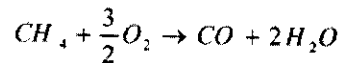
$$\beta = 0.012$$

اثر متقابل توربولانس و واکنش شیمیایی با روش eddy dissipation مدل شده است [۶] که در این مدل نرخ واکنش اتم مینیوم عبارت‌های زیر است:

$$R'_{i,x} = \nu'_{i,x} M_i A \rho \frac{\epsilon}{\kappa} \frac{M_R}{\nu'_{R,x} M_R} \quad (7)$$

$$R'_{i,x} = \nu'_{i,x} M_i AB \rho \frac{\epsilon}{\kappa} \frac{\sum_p \rho M_p}{\sum_p \nu'_{i,x} M_p}$$

واکنش‌های به کار رفته برای سوخت متان به صورت دو مرحله‌ای است:



برای محاسبه میزان نشر NO_x ، فلوننت یک معادله انتقال برای غلظت NO نیز حل می‌کند. فلوننت، علاوه بر این معادله انتقال، برای NO_x سوختی نیز، یک معادله انتقال اضافی برای اجزاء واسطه HCN یا NH_3 (بسته به نوع سوخت) حل می‌کند. معادلات انتقال NO_x بر پایه‌های داده‌های جریان حل شده، حل می‌شود [۷].

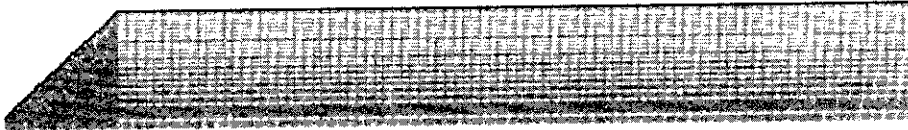
به عبارت دیگر NO_x یک پس پردازنده از جریان شبیه‌سازی شده است، که حل دقیق و درست جریان احتراقی برای محاسبه مقدار NO_x بسیار اهمیت دارد. معادله انتقال جرم برای NO به صورت زیر نوشته می‌شود، که شامل عبارت‌های جابجایی نفوذی، تولید و مصرف NO و اجزای مربوطه است [۷]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla y_{NO}) + S_{NO}$$

(۸)

شود. شبکه استفاده شده در جهت طولی، عرضی و زاویه‌ای $50 \times 40 \times 120$ است. مسئله با تعداد شبکه‌های بیشتر هم حل شده است ($50 \times 140 \times 50$)، ولی تغییر چندانی در حل دیده نشده است که این موضوع مستقل بودن حل از شبکه را نشان می‌دهد.

شکل (۲) شبکه‌بندی محفظه را نشان می‌دهد. هندسه موردنظر برای شبکه‌بندی به دو ناحیه تقسیم شده است. در واقع چون در کار تجربی، توزیع شعاعی نتایج در $X = 0.1$ متر داده شده است، نیاز به تعریف خطی در $X = 0.1$ با شرط مرزی interior مشاهده شده است تا توزیع پارامترها به صورت شعاعی برای مقایسه بر روی این خط نشان داده



شکل ۲- شبکه محاسباتی موردنظر.

در $X = 0.1$ در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج کار عددی انجام شده در مرجع (روش LES) و کار عددی انجام شده در این تحقیق و کار تجربی تطبیق خوبی دارد. به جز در مرکز که مطابق با مرجع می‌تواند به دلیل خطای پروپ اندازه‌گیری دما در اثر تابش باشد. شکل (۴) توزیع شعاعی نسبت مولی متان را در $X = 0.1$ نشان می‌دهد که تطبیق قابل قبولی با نتایج عددی دارد.

بخار با نسبت‌های بخار به سوخت 0.5 و 1 به محفظه پاشیده می‌شود. شکل (۵) کانتورهای دما را در سه حالت نسبت بخار به سوخت 0 و 0.5 و 1 نشان می‌دهد. با ورود بخار به محفظه احتراق دمای ماکزیمم کاهش می‌یابد. در واقع بخار همانند چاه حرارتی عمل می‌کند و گرمای محفظه را جذب می‌کند.

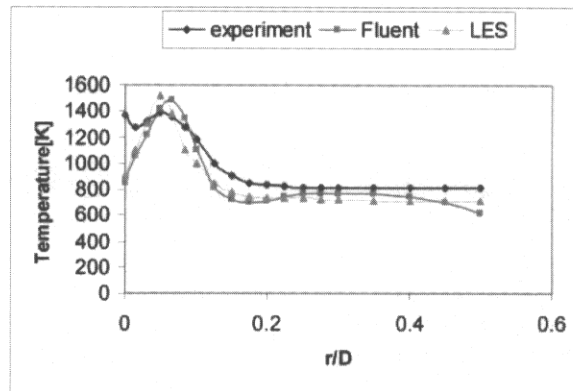
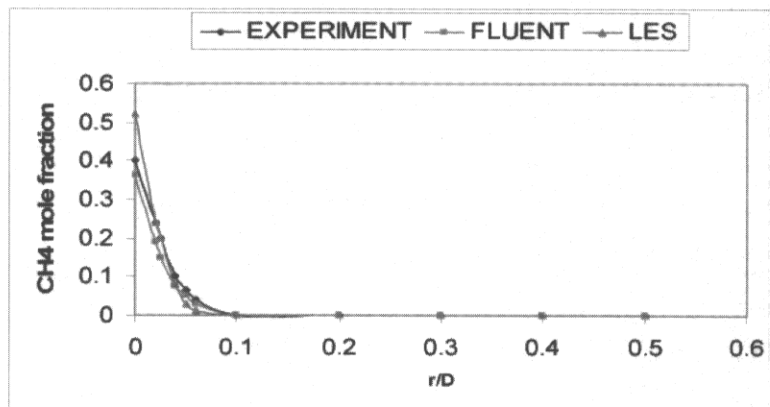
در نسبت بخار به سوخت صفر دمای ماکزیمم 1910 کلوین و در نسبت بخار به سوخت 0.5 ماکزیمم دما تا 1820 کلوین و در نسبت بخار به سوخت 1 تا دمای 1760 کلوین کاهش می‌یابد. پاشش بخار باعث تغییر چشمگیر در الگوی جریان (مانند نواحی گردش و نواحی دما یکسان) نمی‌شود.

برای گسسته‌سازی عبارت‌های جابجایی معادلات حاکم از طرح بالادستی مرتبه اول و برای تصحیح میدان فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است [۴].

روش حل عددی بر پایه حجم محدود و شرایط دایمی است [۴]. در ورودی سوخت و هوا و بخار، شرط مرزی سرعت ورودی و در خروجی از محفظه هم، شرط مرزی فشار ثابت استفاده شده است. سرعت سوخت در ورود به محفظه 54 متر بر ثانیه و سرعت هوا 21 متر بر ثانیه است. دمای سوخت و هوا در ورود 300 کلوین است و فشار اتمسفریک است. برای دیواره بالا از شرط انتقال حرارت تابشی و جابجایی (mixed) استفاده شده است. خط مرکزی محور تقارن در نظر گرفته شده است. برای شروع واکنش‌های شیمیایی دمای اولیه را 2000 کلوین در نظر می‌گیریم که به این ترتیب جرقه مدل می‌شود [۷].

نتایج

ابتدا، صحت محفظه احتراق مدل شده با مقایسه نتایج آن با مرجع [۸] تأیید شده است. مدل مورد استفاده در مرجع [۸] توسط فلونتت مدل‌سازی شده است. توزیع شعاعی دما

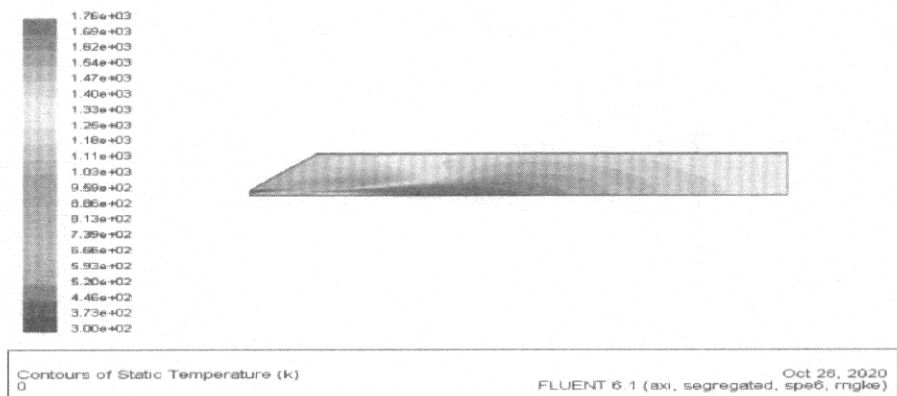
شکل ۳- توزیع شعاعی دما در $X=0.1$.

شکل ۴- توزیع شعاعی نسبت مولی متان.

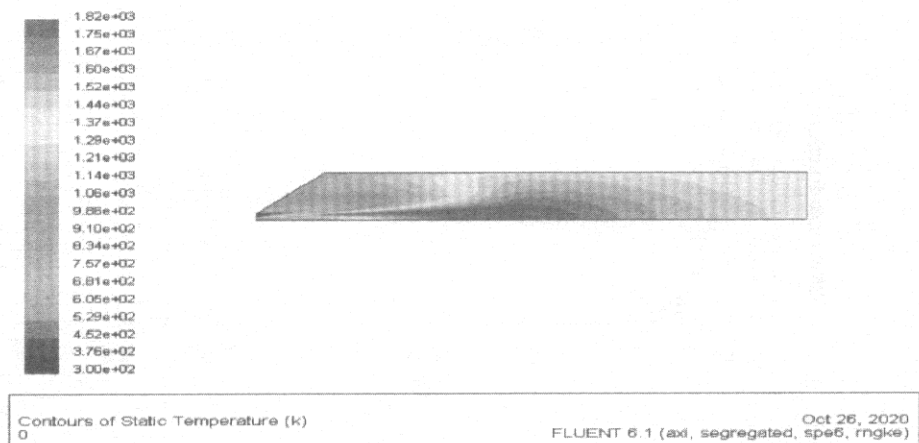
شعله تشکیل شده است. در واقع اساس کار تزریق بخار، کاهش دمای پیک شعله است که در این نمونه بخار با نفوذ به قلب شعله بدون اینکه پایداری شعله را از بین ببرد یا الگوی جریان را تغییر بدهد، دمای شعله را جذب می‌کند، (به دلیل ظرفیت گرمایی بالا) و دمای پیک را کاهش می‌دهد. با جذب گرما و کاهش دما، دیگر انرژی لازم برای شکستن پیوندهای قوی N_2 وجود ندارد.

شکل (۶) کانتور NO را بر حسب ppm نشان می‌دهد. شایان ذکر است که خروجی نرم‌افزار فلونت بر حسب نسبت جرمی یا مولی یا غلظت مولی است و غلظت NO را بر حسب ppm، که در صنعت مرسوم است، نمی‌دهد. تابعی تجربی تعریف شده است، که فلونت با استفاده از این تابع تجربی، مقدار نسبت جرمی یا مولی NO را بر حسب ppm محاسبه کند و آن را نشان دهد.

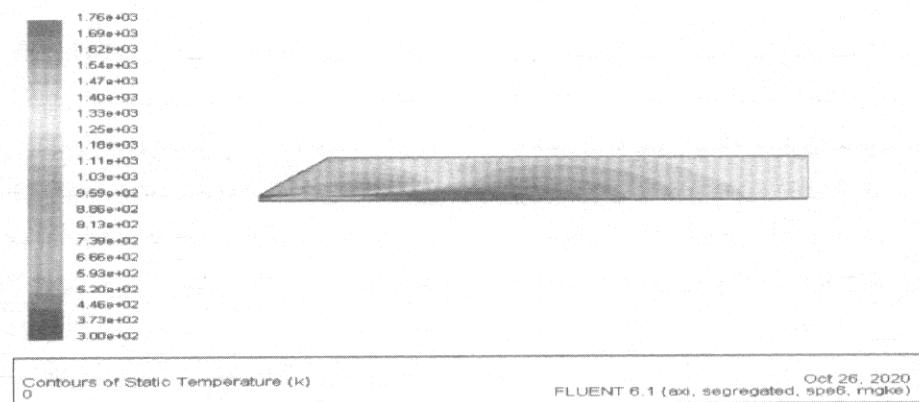
همان‌طور که انتظار می‌رود و در شکل (۶) نیز نشان داده شده است، بیشترین مقدار NO_x در قسمت‌های دما بالای



(الف)



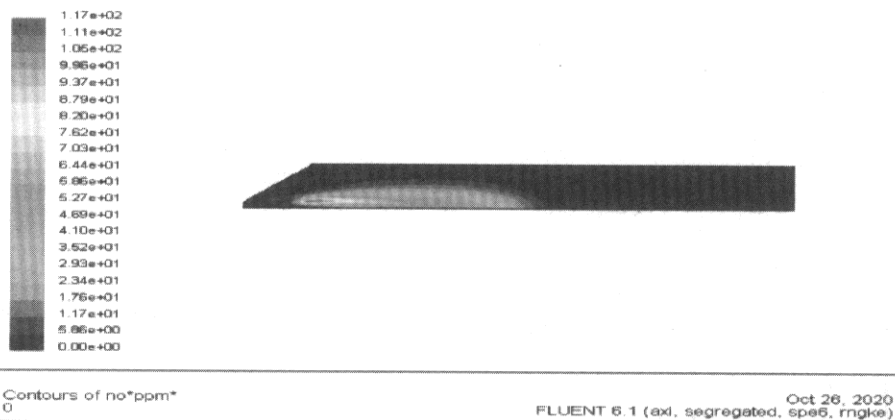
(ب)



(ج)

شکل ۵- کانتورهای دما برای:

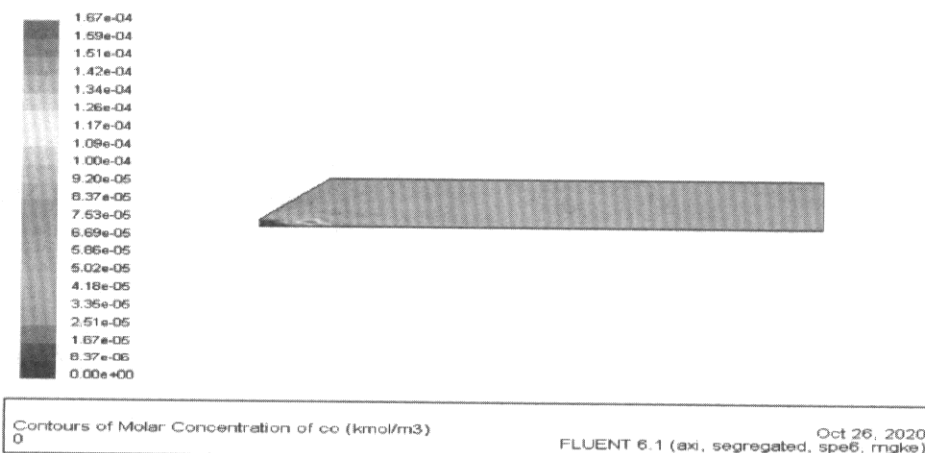
الف) نسبت بخار به سوخت صفر (ب) ۰/۵ (ج) ۱



شکل ۶- کانتور NO برای محفظه بدون پاشش بخار.

شکل (۷) کانتور غلظت مولی CO را نشان می‌دهد. CO در نواحی دما پایین شعله تشکیل می‌شود. مطابق شکل، CO عکس NO در ناحیه دما بالای شعله مقدارش مینیمم است. در ابتدای ورودی محفظه احتراق یعنی جایی که ورودی سوخت و هواست، به دلیل اینکه هنوز واکنشی کامل نشده، مقدار CO تقریباً صفر است. در طول شعله نیز در نواحی دما پایین، CO بیشتری تولید می‌شود. چون با کاهش دما اکسیداسیون CO کم می‌شود. با پاشش بخار دمای پیک کاهش می‌یابد و به‌طور کلی دمای شعله کمتر می‌شود، به دنبال آن نواحی دما پایین هم افزایش می‌یابد بنابراین، نسر CO نیز زیاد می‌شود.

در محفظه بدون پاشش بخار مقدار NO تولیدی ۱۱۷ ppm است. این مقدار تقریباً زیاد است. با پاشش بخار با نسبت بخار به سوخت ۰/۵ این مقدار ماکزیمم به ۴۱ ppm می‌رسد و با افزایش نسبت بخار به سوخت تا ۱، مقدار ماکزیمم NO به ۲۲/۶ ppm می‌رسد که کاملاً منطقی است. در واقع این کاهش NO_x بر حسب دما به صورت نمایی است. نسر NO حرارتی که معمولاً در احتراق‌های دما بالا مکانیزم غالب است، به صورت نمایی با دما ارتباط دارد. با ورود بخار به محفظه با نسبت بخار به سوخت ۰/۵ میزان کاهش NO_x تا ۶۵ درصد است و با نسبت بخار به سوخت ۱ این کاهش به ۸۱ درصد هم می‌رسد.



شکل ۷- کانتور های نسبت مولی CO برای محفظه بدون پاشش بخار.

- Industrial Gas Turbine", ASME 98-GT-292, 1998.
- [4] Patankar S.V. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, 1980
- [5] Versteeg, H.K. and Malasekera, W. "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method", Longman, 1995.
- [6] Magnussen, B.F. and Hjertger B.H. "On Mathematical Model of Turbulence Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", 16th Symp. on Combustion, The Combustion Institute, 1976.
- [7] "Fluent User's Manual", Version 6.1, Fluent Europe LTD, Sheffield, UK.
- [8] Yaga, M., Sasada K., Yamamoto, T., and Aoki, M.T. "An Eddy Characteristic Time Modeling In LES for Gas Turbine Combustors", 2000 the Joint Power Generation Conf. Miami Beach, Florida, USA, pp. 23-26, July 2000.

با پاشش بخار با نسبت بخار به سوخت ۰/۵ حدود ۷۴ درصد نشر CO افزایش می‌یابد و با پاشش بخار با نسبت ۱ حدود ۹۸ درصد افزایش در نشر CO مشاهده می‌شود. کاهش NO_x در نسبت ۱، ۸۴ درصد است، اما میزان افزایش نشر CO تا ۹۸ درصد است. اگرچه می‌توان میزان پاشش آب را افزایش داد تا نشر NO_x کمتر شود، اما نشر CO بسیار افزایش می‌یابد که این خود یک محدودیت برای پاشش بخار است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق پاشش بخار به محفظه احتراق با دبی‌های مختلف بررسی شد که برای تأیید صحت نتایج، محفظه مدل شده با محفظه موجود در مرجع مقایسه شده است. سازگاری خوبی بین نتایج مشاهده شد. نتایج مهم عبارتند از:

۱. با پاشش بخار، به محفظه تغییر چشمگیری در الگوی جریان مشاهده نمی‌شود.

۲. ماکزیمم نشر NO_x در نقاط دما بالای شعله است. با افزایش مقدار پاشش بخار، میزان نشر NO_x کاهش می‌یابد. برای نسبت بخار به سوخت ۱، NO_x تا ۸۴ درصد کاهش می‌یابد.

۳. ماکزیمم نشر CO در نقاط دما پایین شعله است. با افزایش مقدار پاشش بخار، میزان نشر CO افزایش می‌یابد. در نسبت بخار به سوخت ۱، ۹۸ درصد افزایش در نشر CO وجود دارد.

۴. به دلیل افزایش نشر CO با افزایش دبی بخار ورودی، محدودیت در مقدار بخار پاشیده وجود دارد.

مراجع

- [1] Shaw, H. "The Effect of Water, Pressure, and Equivalence Ratio on Nitric Oxide Production in Gas Turbine", ASME J. Eng. Power, 96, pp. 240-246, 1974.
- [2] Schetter, B. "Gas Turbine Combustion and Emission Control Combined Cycle for Power Plant", Von Karman Institute, Lecture Series, 1993-08, 1993.
- [3] Liever, P.A., Myers, G.D., and Griffith, T., "CFD Assessment of a Wet, Low-Nox Combustion System for a 3MW-Class