سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸
انجمن احتراق ایران
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده‌مهندسی‌هوافضا
FCCI2010-1203

مطالعه کاهش بهینه آلودگی NO_x سوخت گاز طبیعی با خنک کاری دیواره، پیش گرمایش و تزریق آب

حمید رضا کاویانی[۱] ،ابوالقاسم مسگرپور طوسی[۲]
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
Hamid_kaviani@aut.ac.ir

چکیده

.با افزایش سختگیری در معیارهای استاندارد آلودگی هوا، تلاشهای زیادی برای کاهش آلاینده NO_x صورت می‌پذیرد. در این تحقیق از مدل آشفتگی $\kappa-\varepsilon$ و الگوریتم سیمپل بترتیب برای مدلسازی آشفتگی جریان و حل جریان استفاده شده است. ابتدا مدل برای یک کار آزمایشگاهی اجرا شده و نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده است. پس از آن در مدلسازی محفظه احتراق مورد نظر، بخار به محفظه تزریق شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده حالت بهینه حداقل آلودگی بدست آمده است. در این کار اثر خنک کاری دیواره بررسی شده است. سپس به گرمایش مواد قبل از ورود به محفظه که در سیکهای ترکیبی انجام می‌گیرد پرداخته شده است. برای این منظور از محفظه استوانه‌ای دارای تقارن محوری استفاده شده است. مدل برای دو حالت با خنک کاری دیواره و بدون خنک کاری دیواره اجرا شده و با تلفیق این روشها آلودگی کمینه برای NO_x بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: متان- NO_x - پاشش آب—خنک کاری دیواره- پیش گرمایش

۱- مقدمه

از زمان شروع به کار اولین توربین گاز، تلاش در جهت کاهش نشر آلاینده آن آغاز و روشهای زیادی هم در این مورد ابداع شده است. همراستا با این فعالیتها به مرور زمان سختگیری سازمانهای استاندارد جهانی در باره معیارهای آلودگی محیط زیست افزایش یافته است و امروزه در جهت کاهش نشر آلاینده توربین‌های گازی تلاشهای زیادی صورت می‌گیرد.

یکی از پرمصرف‌ترین سوختهای مورد استفاده برای نیروگاههای تولید نیرو در کشورمان گاز طبیعی می‌باشد. آلاینده‌های ناشی از مشعلهای با سوخت گاز طبیعی شامل VOCS(Volatie organic componde), SO_2, NO_x, N_2O, CH_4, CO_2, CO, PM(particutate motter) می‌باشند.

NO_x با سه مکانیزم اساساً تشکیل می‌شود. اصلی ترین مکانیسم تولید NO_x در گاز طبیعی theral NO_x یا NO_x حرارتی است. NO_x حرارتی هنگامی ایجاد می‌شود که جدایش مولکولی N2 و O2 در اثر حرارت و الحاق آنها با یکدیگر رخ می‌دهد بیشتر NO_x حرارتی تولید شده در شمعها و بسته‌های حرارتی در ناحیه‌ای که بالاترین حرارت وجود دارد نزدیک شعله بوجود می اید.هنگامی‌که NO_x حرارتی باشد مشخصات تأثیر گذار عبارتند از ۱ـ مخلوط اکسیژن ۲ـ دمای بالا ۳ـ زمان ماندگاری در دمای بالا. هنگامی‌که این سه فاکتور رشد کند NO_x زیاد خواهد شد. آلاینده‌ها تمایل دارند تا این سه مشخصه را ثابت نگه دارند. میزان آلاینده‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای با اندازه و نوع محفظه احتراق و شرایط عملکرد رابطه دارند (مانند دمای محفظه احتراق، نرخ گرمای آزاد شده و سطح اکسیژن موجود)

۱-کارشناس طراح
۲-دانشیار

دومین مکانیسم تولید NO_x ، Prompt NO_x نامیده می‌شود که از واکنش مولکولهای نیتروژن در هوا با رادیکالهای آزاد هیدروکربن موجود در سوخت ایجاد می‌شوند. میزان NO_x تولید شده از این روش در مسیر شعله نسبت به NO_x حرارتی ناچیز می‌باشد. اگر چه در مشعلهای ultra-low- NO_x میزان اهمیت Prompt NO_x ممکن است زیاد باشد.

سومین مکانیزم تولید NOx, NOx سوخت یا Fuel NO_x نام دارد، که حکایت از ترکیب نیتروژن موجود در سوخت با اکسیژن دارد. اگر با سوختهایی سروکار داشته باشیم که میزان نیتروژن موجود در آنها پایین باشد اساساً میزان اینگونه NO_x پایین خواهد بود .

عبارت NO_x به ترکیب موتوکسید نیتروژن و دی اکسید نیتروژن اتلاق می‌شود. اطلاعات بدست امده از آزمایشات تجربی نشان می‌دهد که در اغلب سوختها فسیلی پس از احتراق حدود 45 در صد NO_x تولیدی از مونوکسید کربن تشکیل شده است. میزان NOx چندان زیاد زیاد نیست ولی بخاطر تأثیر آن بر اتمسفر خیلی مورد توجه قرار گرفته است .

تکنولوژیهای موجود برای کنترل میزان انتشار آلودگی بطور عمده عبارتند از: (۱) تزریق آب یا بخار به داخل محفظه احتراق که باعث کاهش دمای شعله می‌شود (۲) احتراق NO_x کم و خشک(DLN)، در این روش از احتراق چند مرحله‌ای و ترکیب رقیق پیش آمیخته سوخت-هوا استفاده می‌گردد (۳) احتراق با کاتالیزور، یک تکنولوژی نوین که بانضمام لوله‌های خروجی تصفیه کننده انتشار آلودگی را بسیار پایین می‌آورد. (۴) کاهش کاتالیزوری انتخاب شده(SCR) و (۵)SCONOXTM ، یک تکنولوژی دیگر و جدید بر پایه کاتالیزور[1].

روش دیگر مورد استفاده در این راستا کاهش دمای محفظه احتراق از طریق خنک کاری است که در سیکل ترکیبی نیروگاهها استفاده می‌شود، استفاده از مخلوط رقیق سوخت با هوا[۲] سوختهای ترکیبی، افزودن مواد دارای سرعت واکنشی بالاتر از سوخت معمولی به محفظه در برخی از توربوماشینهای تولیدی شرکتهای تولید نیرو و هواپیما مورد استفاده قرار گرفته که نتایج خوبی در کاهش آلودگی هوای محیط داشته است. تحقیقات زیادی صورت گرفته است و روشهای زیادی ابداع شده است.

طراحان موتورهای درونسوز علاقه‌مند به افزایش دمای محفظه بخاطر افزایش راندمان ترمودینامیکی هستند. این به معنای افزایش تولید NO_x حرارتی بوده و برای جلوگیری از بروز این مساله از تزریق آب یا بخار در موتور استفاده می‌شود. با کاهش دمای محفظه تولید NO_x بصورت نمایی کاهش می‌یابد. این روش اولین بار توسط رید-مک گیل[۳] در سال ۱۹۷۴ پیشنهاد شد و سالهاست مورد استفاده قرار می‌گیرد و بطور قابل ملاحظه‌ای میزان نشر NO_x را کاهش می‌دهد. این بخاطر وابستگی شکست مولکولی نیتروژن به دمای بالا و سپس ترکیب N با O و ایجاد NO_x می‌باشد. تزریق آب یا بخار دمای حداکثری محفظه را کاهش می‌دهد. بدنبال آن شکست مولکولی نیتروژن هم کم می‌شود. از طرف دیگر کاهش دمای شعله می‌تواند به افزایش آلودگی CO بیانجامد. پایین‌ترین میزان انتشار بصورت تجربی برای گاز طبیعی ۲۵ ppm و برای نفت ۴۲ ppm بوده است[۵]. در تحقیقات نشان داده شده است که مقدار کاهش NO_x به نسبت آب یا بخار تزریق شده به سوخت بستگی زیادی دارد. با افزایش پاشش آب یا بخار ، NO_x را تا ۹۴٪ هم می‌توان کاهش داد[۶].

۲-روابط مورد استفاده

به منظور تحلیل عددی مدل مورد نظر، نیاز به حل معادلات متوسط زمانی ممنتم، پیوستگی، انرژی و حالت است. معادلات مورد استفاده برای این منظور عبارتند از:

پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

ممنتم:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) \qquad (۲)$$

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

انرژی:

$$u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{u_i' T'}\right) \quad (۳)$$

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

$$P = \rho R T \quad (۴)$$

به منظور بستن دستگاه معادلات ناویر-استوکس، مدل توربولانس مناسب نیاز است که در این تحقیق از مدل $\kappa-\varepsilon$ استاندارد با تابع دیواره(برای بهبود مدلسازی رفتار سیال در دیواره) استفاده شده است که به شکل زیر ارائه می‌شود[۶]:

انرژی جنبشی آشفتگی:

$$\rho u_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = T_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho\varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_\kappa \mu_{eff} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j}\right] \quad (۵)$$

نرخ استهلاک:

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1}^* \frac{\varepsilon}{\kappa} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\alpha_e \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] \quad (۶)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_T$$
$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (۷)$$

ضرائب مدل:

$$c_{\varepsilon 1} = 1.42 \qquad c_{\varepsilon 2} = 1.68 \qquad c_\mu = .0845 \qquad \alpha_\kappa = \alpha_\varepsilon = 1.39 \quad (۸)$$

$$c_{\varepsilon 1}^* = c_{\varepsilon 1} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$$
$$\eta = (2E_{ij}.E_{ij})^{.5} \frac{\kappa}{\varepsilon}$$
$$\eta_0 = 4.377$$
$$\beta = 0.012 \quad (۹)$$

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

$$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$$
$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 \quad (۱۰)$$

برای محاسبه میزان نشر NO_x ، یک معادله انتقال برای غلظت NO هم حل می‌شود. معادلات انتقال NO_x بر پایه‌های داده‌های جریان حل شده، حل می‌شود. به عبارت دیگر NO_x یک پس پردازنده از جریان شبیه سازی شده است. حل دقیق و درست جریان احتراقی برای محاسبه مقدار NO_x بسیار اهمیت دارد.

معادله انتقال جرم برای NO بصورت زیر نوشته می‌شود که شامل عبارتهای جابجائی نفوذی، تولید و مصرف NO و اجزاء مربوطه است[۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho y_{NO}) + \nabla.(\rho \vec{v} y_{NO}) = \nabla.(\rho D \nabla y_{NO}) + S_{NO} \quad (۱۱)$$

y_{NO} نسبت جرمی‌در فاز گازی است. S_{NO} هم ترم چشمه است که برای مکانیزم‌های مختلف تشکیل NO_x با استفاده از متد PaSR محاسبه می‌شود. از این مدل برای تخمین متغیرهایی از قبیل : محدوده‌های پایداری سوزش[1]،راندمان احتراق ، شدت احتراق ، افت کل، شرایط ایجاد جرقه و نرخ انتقال حرارت در جریان‌های مغشوش استفاده می‌شود . در مدل PaSR سلول محاسباتی به دو بخش مجزا تقسیم می‌شود:[۳]

۱-ناحیه واکنشی

۲- ناحیه غیر واکنشی

ناحیه واکنشی مانند یک راکتور اختلاط کامل[2] (PaSR) عمل می‌کند و همه اجزاء کاملا با هم ترکیب می‌شوند. وبه همین دلیل می‌توان از وجود نوسانات در محاسبات جملات منبع شیمیایی صرف‌نظر کرد.

$$\sum_{i=1}^{N}\alpha_{ij}{}^{+}Y_i \underset{k_j^-}{\overset{k_j^+}{\rightleftharpoons}} \sum_{i=1}^{N}\alpha_{ij}{}^{-}Y_i \qquad (۱۲)$$

Y_i درصد جرمی‌اجزا است. هر جزء واکنش ،j نشاندهنده هر واکنش ، α_{ij} ضریب استوکیومتریک واکنش ،N تعداد اجزاء ، k ثابت واکنش، + برای واکنش رفت و - برای واکنش برگشت استفاده شده است.

به این ترتیب برای نرخ واکنش خواهیم داشت:

$$RR_j^{\pm} = k_j^{\pm}\prod_{i=1}^{N}[Y_i]^{\alpha_{ij}^{\pm}} \qquad (۱۳)$$

$$\dot{\omega}_i = \sum_{j=1}^{R}(\alpha_{ij}^{-} - \alpha_{ij}^{+})(RR_j^{+} - RR_j^{-}) \qquad (14)$$

$$\dot{\omega}_h = \sum_{j=1}^{R}(-\Delta H_j)(RR_j^{+} - RR_j^{-}) \qquad (۱۵)$$

$$\Delta H_j = \sum_{i=1}^{N}(\alpha_{ij}^{+} - \alpha_{ij}^{-})(h_i)_f^{ref} \qquad (۱۶)$$

$(h_i)_f^{ref}$ گرمای تشکیل جزء i در دمای مرجع می باشد.

$$\Delta H_{combustion} = \sum_{j=1}^{R}\Delta H_j \qquad (۱۷)$$

R تعداد واکنشها است. برای یک واکنش احتراق یک مرحله‌ای این روابط به صورت زیر می‌باشد:

$$\alpha(fuel) + \beta(oxegen + 3.773N_2) \xrightarrow{k_f} \gamma(CO_2) + \eta(H_2O) + 3.773\beta(N_2) \qquad (۱۸)$$

نرخ واکنش برای معادله فوق اینگونه نوشته می‌شود:

$$RR = k_f C_{fuel}^{\alpha} C_{o2}^{\beta} \qquad (۱۹)$$

k_f از معادله آرینیوس به دست می اید:

$$RR = AT^b \exp(\frac{-E}{RT}) C_{fuel}^{\alpha} C_{o2}^{\beta} \qquad (۲۰)$$

R ثابت جهانی گازها است و مقادیر A, b, E از مکانیزمهای احتراق بدست می اید. NO_x با واکنشهای زلدویچ(Zeldovich) بدست می اید. واکنشهای اساسی حاکم بر تولید NO_x حرارتی بدین صورت است:

[1] Blow off stability limits
2Perfectly Stirred Reactor

$$O + N_2 \leftrightarrow N + NO$$
$$N + O_2 \leftrightarrow O + NO \qquad (۲۱)$$
$$N + OH \leftrightarrow H + NO$$

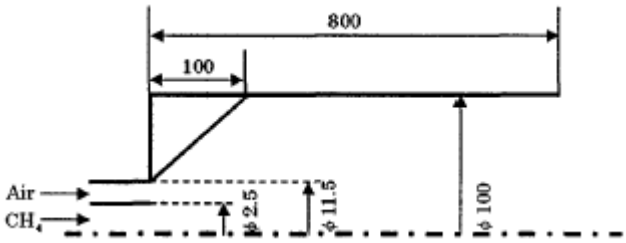
مقادیر A, b, E از مطالعات بسیاری که در زمینه مکانیزمهای احتراق صورت گرفته بدست می اید. این مطالعات با آزمایشات بلوچ وهانسون و سالیمان معتبر می‌شود. بر این اساس ضرایب ثابت عبارتند از:

$$k_{f,1} = 1.8\times10^{8}\exp(\frac{-38370}{T})$$
$$k_{f,2} = 1.8\times10^{4}\exp(\frac{-4680}{T})$$
$$k_{f,3} = 7.1\times10^{7}\exp(\frac{-450}{T})$$
$$k_{r,1} = 3.8\times10^{7}\exp(\frac{-425}{T})$$
$$k_{r,2} = 3.8\times10^{3}\exp(\frac{-20820}{T})$$
$$k_{r,3} = 1.7\times10^{8}\exp(\frac{-24560}{T}) \qquad (۲۲)$$

زیر نویس f برای واکنشهای رفت و r برای واکنشهای برگشتی است. زیر نویس بعدی بیانگر شماره واکنش به ترتیب ارائه در (۲۲) می‌باشد. تمامی‌ثابتهای واکنش دارای واحد m3 /gmol-s است.

۳-هندسه و شرائط مسئله

شکل هندسی محفظه احتراق مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. طول محفظه ۰/۸ متر و قطر آن ۰/۲ متر است. قطر مجرای ورودی سوخت ۰/۰۵ متر است. هوا هم از مجرائی با قطر خارجی ۰/۰۱۱۵ متر و قطر داخلی ۰/۰۰۵ وارد محفظه می‌شود.



شکل ۱-شکل هندسی محفظه احتراق

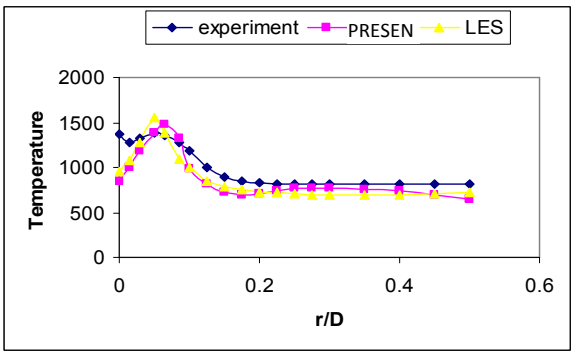
.شبکه استفاده شده دارای ۳۵۰۰ گره می‌باشد. مسئله با تعداد گره‌های بیشتر هم حل شده است، ولی تغییر چندانی در حل دیده نشده است که این موضوع مستقل بودن حل از شبکه را نشان می‌دهد. برای گسسته سازی عبارت‌های جابجائی معادلات حاکم از طرح بالادستی مرتبه اول و برای تصحیح میدان فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است.

روش حل عددی بر پایه حجم محدود و شرائط جریان دائمی است. 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 ۵۴ متر بر ثانیه و سرعت هوا ۲۱ متر بر ثانیه است. دمای سوخت و هوا در ورود ۳۰۰ کلوین است.فشار اتمسفریک است. دیواره بالا از شرط انتقال حرارت تابشی و جابجایی استفاده شده است.خط مرکزی هم محور تقارن در نظرگرفته شده است. بدلیل اینکه اغتشاش در ورودی این محفظه زیاد است، عمل اختلاط در ورودی به خوبی انجام می‌گیرد و انرژی لازم برای شروع واکنشها

فراهم می‌شود. برای شروع واکنشهای شیمیایی دمای اولیه را ۲۰۰۰ کلوین در نظر می‌گیریم که به این ترتیب جرقه مدل می‌شود[۸].

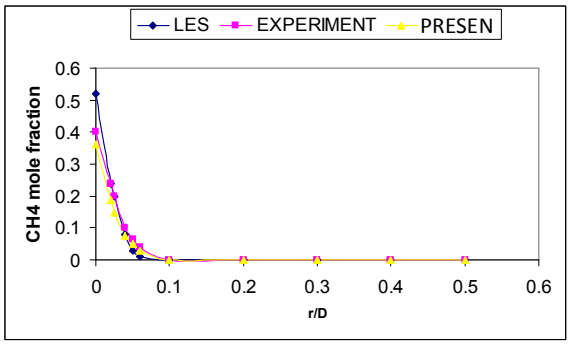
۴-نتایج

ابتدا صحت محفظه احتراق مدل شده با مقایسه نتایج آن با مرجع [۵] تایید شده است. توزیع شعاعی دما در x = ۰/۱ در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج کار عددی انجام شده در مرجع(LES) و کار عددی انجام شده در این تحقیق(PRESENT) و کار تجربی (EXPERIMENT) تطبیق خوبی دارد. بجز در مرکز که مطابق با مرجع می‌تواند بدلیل خطای پروب اندازه گیری دما در اثر تابش باشد.



شکل۲- توزیع شعاعی دما در x=۰/۱

شکل ۳ توزیع شعاعی نسبت مولی متان را در x =۰/۱ نشان می‌دهد که تطبیق قابل قبولی با نتایج عددی دارد.

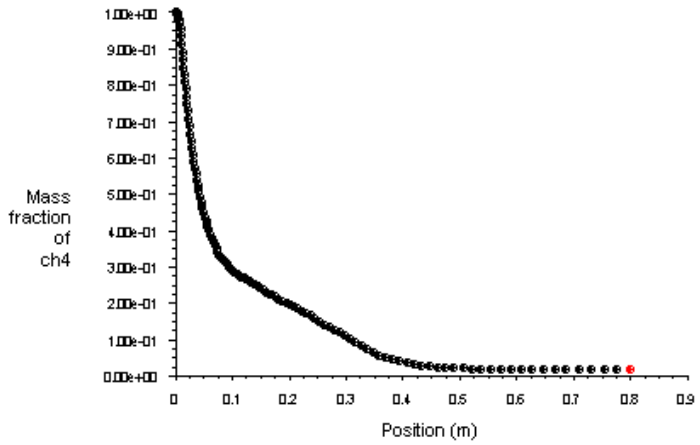


شکل ۳- توزیع شعاعی نسبت مولی متان

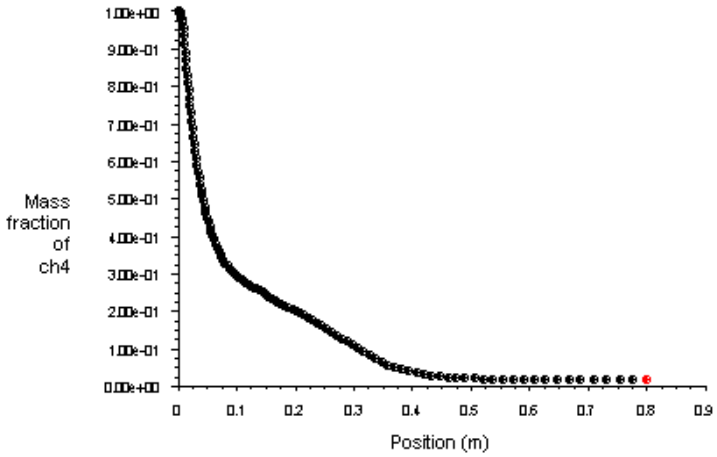
بخار با نسبت‌های بخار به سوخت ۰/۵و ۱ به محفظه پاشیده می‌شود. با ورود بخار به محفظه احتراق دمای ماکزیمم کاهش می‌یابد. در نسبت بخار به سوخت صفر دمای ماکزیمم ۱۹۱۰ کلوین و در نسبت بخار به سوخت ۰/۵ ماکزیمم دما تا ۱۸۵۰ کلوین و در نسبت بخار به سوخت ۱ تا دمای ۱۷۶۰ کلوین کاهش می‌یابد. پاشش بخار باعث تغییر چشمگیر در الگوی جریان مانند نواحی گردش نمی‌شود.

با استفاده از لاینر جداره محفظه تا خنک کاری شده و دمای آن تا ۱۸۰۰ درجه کلوین پایین می آید. در این وضعیت پارامترها با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

الگوی نسبت جرمی‌متان در هر دو حالت ثابت می‌ماند و مقادیر عددی آن نیز تغییر محسوسی ندارند. در خروجی محفظه هم این نسبت در هر دو حالت دارای مقدار $۱/۷۱\times۱۰^{-۲}$ می‌باشد. نتایج توزیع نسبت جرمی‌متان در شکل ۴ و ۵ قابل مشاهده می‌باشند.

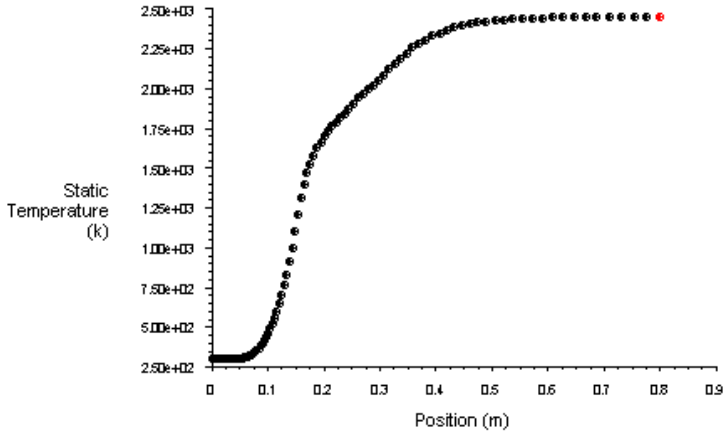


شکل ۴ - توزیع نسبت جرمی CH_4 در طول محور

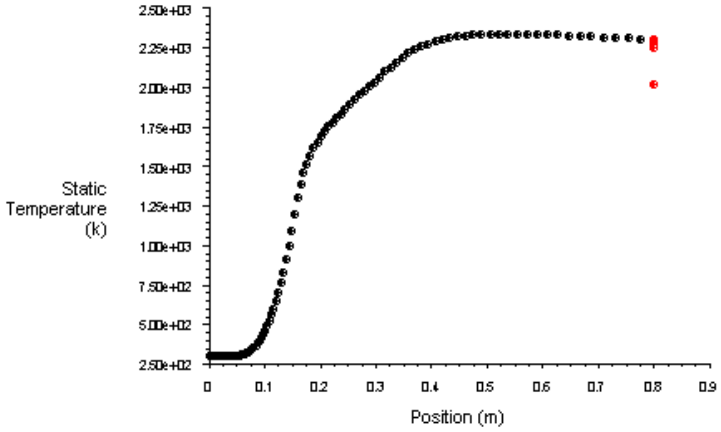


شکل ۵ - توزیع نسبت جرمی CH_4 در طول محور در وضعیت خنک شدن دیواره

اما در مورد نمودار دمایی در محور محفظه مقداری تفاوت در الگو و مقدار نهایی با یکدیگر دارند که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود. در وضعیت عادی این منحنی صافتر و به لحاظ کمیتی مقداری بزرگتر است.

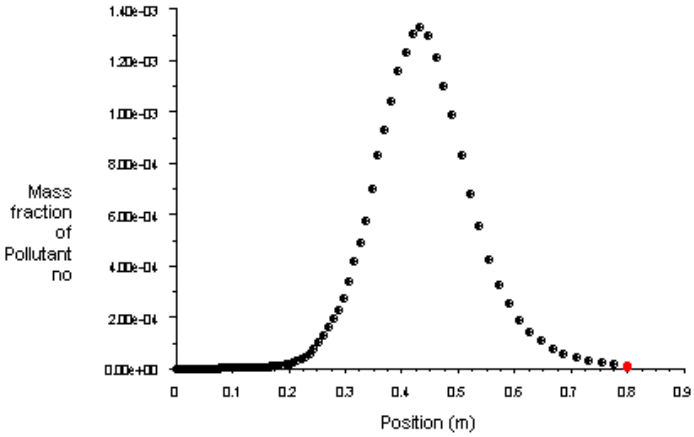


شکل ۶ - توزیع دمای استاتیک در طول محور در وضعیت عادی

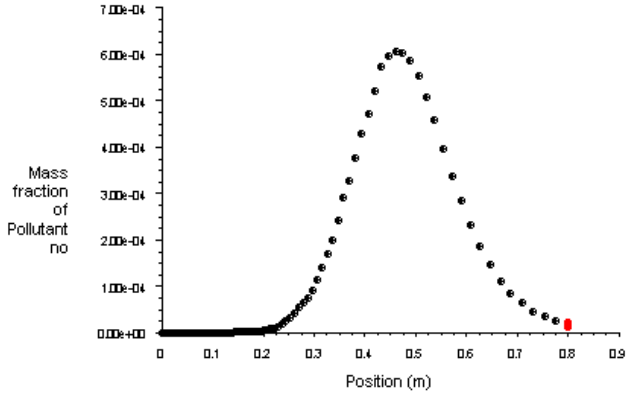


شکل ۷ - توزیع دمای استاتیک در طول محور در وضعیت خنک شدن دیواره

در مورد آلاینده NO_x که هدف اصلی این مطالعه است، در حالت عادی دارای مقدار ۶×۱۰^{-۶} هنگام خروج از محفظه می‌باشد. این مقدار برای محفظه دارای خنک‌کاری $۱/۲\times۱۰^{-۵}$ می‌باشد. این تقریبا دو برابر حالت عادی است. این نمودار نشان می‌دهد که خنک‌کاری دیوار محفظه برخلاف خنک‌کاری محفظه، باعث افزایش میزان آلاینده NO_x می‌شود.

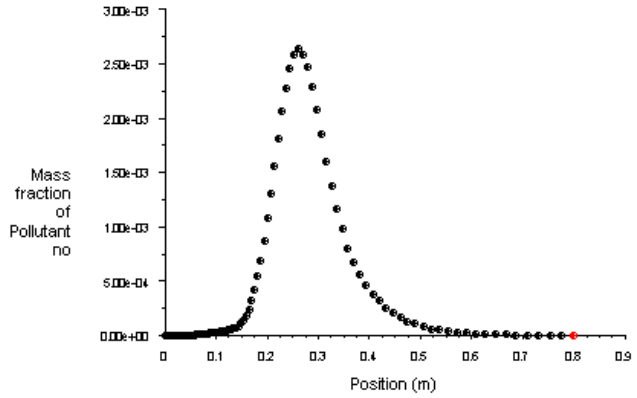


شکل ۸ - توزیع نسبت جرمی No در طول محور در حالت عادی



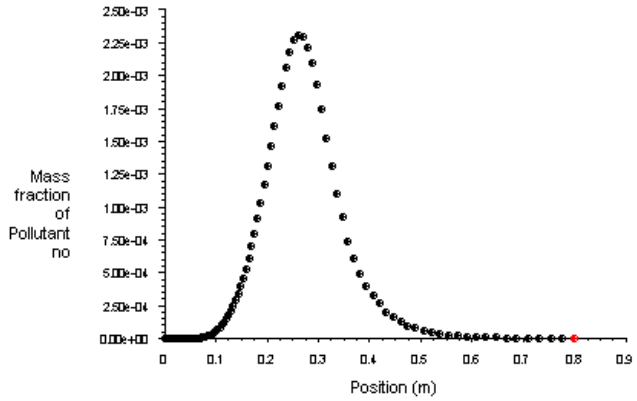
شکل ۹ - توزیع نسبت جرمی No در طول محور در حالت خنک کاری دیواره

در مورد پیش گرم نمودن جریان ورودی به محفظه و اثر آن می‌توان از مقایسه این نمودار بعد استفاده نمود. در این نمودار میزان آلاینده در هنگام خروج سیال از محفظه برابر با ۶×۱۰^{-۷} می‌باشد، که یک دهم میزان متناظر برای حالت عادی است. این مقدار برای ۳۰۰ درجه پیش‌گرم کردن صورت گرفته است.



شکل ۱۰ - توزیع نسبت جرمی No در طول محور در حالت پیش‌گرم کردن مواد

با افزودن پنج درصد جرمی‌آب به هوای ورودی، منحنی شکل ۱۱ حاصل می‌شود. در این نمودار میزان آلاینده در هنگام خروج سیال از محفظه برابر با ۴×۱۰^{-۷} می‌باشد، که در مقایسه با ۶×۱۰^{-۷} یک سوم کاهش داشته است.



شکل ۱۱ - توزیع نسبت جرمی No در طول محور در حالت پیش‌گرم کردن مواد با افزودن آب

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پاشش بخار به محفظه احتراق ،خنک‌کاری دیواره و پیش‌گرم کردن سیال ورودی به محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفت نتایج مهم عبارت است از:

۱. پیش گرم‌کردن و سپس افزودن آب به ترتیب بیشترین تاثیر را در کاهش آلاینده دارند.
۲. خنک‌کاری دیواره محفظه باعث افزایش میزان آلودگی شده است.
۳. با پاشش بخار به محفظه تغییر چشمگیری درالگوی جریان (نواحی دماثابت،...) مشاهده نمی‌شود.

مراجع

1- Ueli Honegger, “Gas Turbine Combustion Modeling for a Parametric Emission Monitoring System”, MS Thesis, Kansas State University, 2007
2- Kurz, R., Ohanian,S, "Modeling Turbomachinery in Pipeline Simulations" PSIG 35th Annual Meeting., 2003.
3- Reed, Robert D. Mcgill, Eugene C. ," Fuel-water vapor premix for low NOx burning",United States Patent 4089639
4- Koch , H.,and Felix, p. 1977, "Exhast Gas Emission of Brown Boveri Rev.", 64 Jan., PP. 27-33
5- Schetter B., 1993, "Gas Turbine Combustion and Emission control," combined cycle for power plant, Von Karman Institue, Lecture Series 1993-08.
6- Liever , P.A. ; Myers , G.D. ; Griffith , Tim ; “ CFD Assessment of a Wet , Low-Nox Combustion System For a 3MW –Class Industrial Gas Turbine” ASME 98-GT-292 ,1998
7- Yaga, Mitsura et al, " An Eddy Characteristic Time Modeling In LES for Gas Turbine Combustor", proceeding of 2000 international joint power Generation conference Miami Beach, Florida, july 23-26,2000.
8- Versteeg and w. Malasekera " An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method" Longman, 1995.
9- Magnussen, B.f. and Hjertger B.H " On Mathematical Model Of Turbulence Combustion With Special Emphasis On Soot Formation and Combustion", 16th sump. On combustion , the combustion institute, 1976.
10- Patankar, S, V., "Numerical HeatTtransfer and Fluid Flow" Hemisphere, pub.1980.