فصلنامه تحقیقات مکانیک کاربردی
جلد ۳، شماره ۳، ص‌ص ۱۱ الی ۱۶، زمستان ۱۳۹۰
تاریخ دریافت: ۹۰/۰۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۹/۲۲

بررسی عددی احتراق و چگونگی کاهش آلاینده‌های اکسیدنیتروژن (NO_x) در یک دیگ‌بخار صنعتی

حسین عریانی و آرش نعمتی – دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه
شهرام خلیل آریا و صمد جعفرمدار – استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه

E-mail: hossein_oryani@yahoo.com

چکیده: با توجه به قیمت روز افزون سوخت‌های فسیلی و همچنین آلودگی محیط زیست بهبود مسئله احتراق در نیروگاه‌ها اهمیت خاصی دارد، تا علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف سوخت، آلودگی ناشی از آلاینده‌های مختلف نظیر اکسیدهای نیتروژن کاهش یابد. در این مقاله به مسئله کنترل احتراق در یک دیگ صنعتی، از طریق تعیین نرخ حرارتی و دمای گاز در سطوح و نواحی مختلف و همچنین بررسی پارامترهای موثر در فرآیند احتراق پرداخته می‌شود. در این مطالعه مشکل آلودگی مدل 3D کوره 160 MW با سوخت گاز طبیعی و دو مشعل عمودی همراستا بررسی می‌شود. دیگ شبیه‌سازی شده دارای دو قسمت با انتقال گرمای جابجایی و تشعشعی بوده که از هم جدا شده‌اند و انتقال‌حرارت غالب انتقال گرمای تابشی است. لوله‌های آب در عبور از قسمت جابجایی واقع در پایین دیگ به بخار داغ تبدیل می‌شوند. معادلات بقا جرم، اندازه‌حرکت، انرژی، و معادلات انتقال غلظت گونه‌ها، درهمی، احتراق و مدل تشعشعی، بعلاوه مدل معادله NO_x، به صورت همزمان حل شده‌اند، تا توزیع دما و غلظت NO_x در قسمت تشعشعی و جابجایی دیگ بدست آید. نتایج بدست‌آمده با نتایج موجود در ادبیات فن مقایسه شد و همخوانی مطلوبی مشاهده شده‌است . نتایج نشان می‌دهد که ماکزیمم دما در کوره کاهش یافته و غلظت NO_x به طور محسوسی کم شده‌است.

واژه های کلیدی: احتراق، شبیه سازی، آلاینده NO_x، روش CFD ، بویلر صنعتی.

Numerical Investigation of Combustion and NO_x Emission in an industrial Boiler

H. Oryani and , A. Nemati, M. S. Student, Dept. of Mech. Eng., The University of Ouremeyeh
S. Khalil Arya and S. Jafarmadar, Ass. Prof., Dept. of Mech. Eng., The University of Ouremeyeh

Abstract: Understanding of how and where NO_x formation occurs in industrial boiler is very important for efficient and clean operation of utility boilers. The present study aims to investigate numerically the problem of NO_x pollution using a 3D model furnace of an industrial boiler utilizing fuel gas. the boiler under investigation is a 160 MW, water-tube boiler, gas fired with natural gas and having two vertically aligned burners. Governing conservation equations of mass, momentum and energy, and transport equations of species concentrations, turbulence, combustion and radiation modeling in addition to NO modeling equations were solved together to present temperature and NO distribution inside the radiation and convection sections of the boiler. In order to - validate the computational procedure, comparison of the present calculations with the experimental data for specific state, was performed.

Keywords: Dilution, Combustion chamber, NO_x, CO, Simulation.

۱- مقدمه

مدل احتراقی Mild به دلیل کاهش آلایندگی و افزایش کارایی احتراق، مدل کارامدی می‌باشد. در این نوع احتراق نیاز است تا واکنش دهنده ها تا بالاتر از دمای خود اشتعالی پیش‌گرم شوند و محصولات احتراق بی‌اثر در منطقه واکنش قرارگیرند و در واکنش شرکت نمایند. با رقیق‌کردن شعله توسط اکسیژن (تا حد مجاز)، دمای نهایی تا پایین‌تر از دمای آدیاباتیک شعله کاهش می‌یابد و این باعث افزایش کارایی می‌شود. پیش‌گرمایش تا بالاتر از دمای خوداشتعالی باعث پایداری شعله بصورت طبیعی می‌شود.

در کار حاضر NO_x به مقدار زیاد کم شده و فرم تشکیل Soot متوقف می‌شود و این به دلیل شرایط رقیق‌سازی بالاست [۳-۱]. این مدل در کوره‌های صنعتی در کارخانه‌های ذوب شیشه به کار می‌رود. در این کوره‌ها ابتدا محفظه احتراق باید توسط حالت احتراق شعله گرم شود چون حالت احتراق Mild نیازمند دمایی بالاتر از دمای خوداشتعالی سوخت است بنابراین وقتیکه بالاترین دما به دمای خوداشتعالی سوخت رسید، احتراق دیگ به حالت احتراق Mild تغییر می‌کند.

در شرایطی که ماکزیمم دما بالاتر از دمای خوداشتعالی است ماکزیمم دما توسط اختلاط ضعیف و رقت بی‌اثر نگهداشته می شود و می‌توان به بازده گرمایی بالا دست‌یافت. مدل احتراقی Mild، به سختی در مدل‌های مرسوم شعله‌های پیش‌آمیخته و پخشی ظاهر می‌شود و بدلیل رقت بالا، دما کاهش‌یافته و به واسطه پدیده اختلاط درهمی و با افزایش بازگردش محصولات احتراق روند این کاهش، افزایش می یابد [۲].

اساسا فرم تشکیل NO_x در طول احتراق در ئیگ‌های گازی از اکسیداسیون نیتروژن در احتراق هوا بوسیله دو مکانیزم شناخته شده Thermal NO_x و Prompt NO_x بوجود می‌آید. نسبت فرم NO_x گرمایی مستقیما از دمای منطقه احتراق و غلظت اکسیژن تاثیر می‌پذیرد و NO_x گرمایی می‌تواند به وسیله کاهش دمای شعله یا محدود کردن غلظت اکسیژن کاهش یابد. در دیگ‌های صنعتی به دلیل پارامترهای مختلفی که روی نحوه فرآیند تشکیل آلاینده NO_x تاثیر می‌گذارد، مسئله بسیار پیچیده-ای می‌باشد. این پارامترها شامل نسبت سوخت به هوا، زاویه چرخش هوا می باشد [۳].

محاسبه عددی فرآیند احتراق در دیگ‌های صنعتی یک مسئله سه بعدی است که با درهمی احتراق و تشعشش و همچنین نحوه تشکیل NO_x درگیر می‌باشد. در محفظه احتراق یک دیگ انتقال‌حرارت بصورت تشعشعی است از این رو پیش‌بینی انتقال حرارت تشعشعی نیاز است تا یک برآورد درستی از بازده حرارتی دیگ بدست آورد بعلاوه برای محاسبه درست تشعشع حرارتی لازم است تا یک پیش‌بینی دقیقی از میدان دما و جریان حرارتی دیواره‌های دیگ ارایه دهد.

۲- تشریح مدل

رشد سریع تکنولوژی و پیدایش کامپیوترهای با سرعت وقدرت محاسباتی بالا و همچنین پیشرفت در الگوریتم های حل عددی، بکارگیری مدلهای ریاضی پیچیده را به منظور توسعه سیستم های احتراق داخلی، جهت جلوگیری از انجام آزمایشات وقت گیر امکان پذیر ساخته است.

۲-۱- معادلات حاکم و مدل‌های بکاررفته

مدل احتراق بکار رفته در این مطالعه سه‌بعدی مدل Finit-Rate/Eddy-Dissipation است که فرض می‌شود نرخ واکنش دهنده‌ها به‌وسیله درهمی و محاسبات سینتیک شیمیایی آرنیوس کنترل می‌شود بنابراین محاسبات آن مشکل می‌باشد. معادلات بقا برای گونه‌های شیمیایی بصورت معادله زیر می-باشد[٤].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho v Y_i) = -\nabla J_i + R_i S_i \quad (۱)$$

که R_i نرخ خالص تولید گونه iام به‌وسیله واکنش دهنده-های شیمیایی و S_i نرخ خالص تولید اضافی گونه از فاز ناپیوسته توسط منبع تایید شده می‌باشد. این معادله برای N-1 گونه حل می‌شود که N تعداد کل گونه های شیمیایی فاز سیال موجود در سیستم می‌باشد. مجموع کسر جرمی گونه ها برابر ۱ است.

$$J_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{ct}})\nabla Y_i \quad (۲)$$

که S_{ct} عدد درهمی Schmidt می‌باشد که در حالت عادی ۰/۷ است. μ_t لزجت درهمی و $D_{i,m}$ نفوذ درهمی می باشد.

فرم NO_x گرمایی فرم زلدویچ می باشد که معادلات آن به صورت زیر است [۵]:

$$O + N \overset{K_1}{\leftrightarrow} N + NO \quad (۳)$$

$$N + O_2 \overset{K_2}{\leftrightarrow} O + NO \quad (٤)$$

$$N + OH \overset{K_3}{\leftrightarrow} H + NO \quad (۵)$$

از مدل $k-\varepsilon$ برای درهمی و مدل تشعشعی DO برای مدل سازی پدیده تابش استفاده شده است. برای مدل سازی دیگ از شبکه نامنظم استفاده شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است:

۲-۲- اعتباردهی مدل

مدل حاضر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent 12 تهیه شده‌است. در جدول (۱) مشخصات دیگ که مدل برای آن تهیه شده، آورده شده است. این دیگ دارای یک مشعل می باشد که این مشعل دارای ۸ انژکتور می باشد. در شکل زیر مقایسه بین منحنی های دمای محفظه احتراق مدل حاضر و نتایج تجربی آورده شده است که تطابق خوبی بین این دو مشاهده می شود.

۳- نتایج مدل

در کار حاضر تاثیر افزودن EGR خارجی به اندازه ۲۵ درصد روی میزان تشکیل آلاینده NO_x بررسی شده است. در شکل زیر مقایسه بین کانتورهای دما در حالت بدون EGR و حالتی که EGR افزوده شده، آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود دمای ماکزیمم در حالت EGR کمتر از حالت پایه است و همین طور حجم مناطق دما بالا نیز در حالت دارای EGR کمتر است. از آنجایی تولید آلاینده NO_x نسبت مستقیم با دمای محفظه احتراق بویلر دارد با کاهش دمای محفظه احتراق میزان تولید آلاینده NO_x کاهش می یابد.

از طرف دیگر از آنجایی که با افزودن EGR چگالی هوای ورودی به محفظه احتراق کاهش می یابد و از این رو میزان اکسیژن موجود در هوای ورودی کمتر از حالت بدون EGR است. کاهش غلظت هوای ورودی و کاهش میزان اکسیژن باعث نزدیک شدن فرآیند احتراق به حالت Mild Combustion می شود. چون تولید NOx نسبت مستقیم با میزان اکسیژن دارد پس میزان تولید NOx با افزودن EGR و بازخورانی گازهای خروجی از محفظه احتراق کاهش می یابد.

٤- نتیجه گیری

بازخورانی محصولات احتراق خروجی از محفظه احتراق یا همان استفاده از EGR به دلایل ریر باعث کاهش میزان تولید آلاینده NOx می کند.

- کاهش دمای ماکزیمم و کاهش حجم مناطق دما بالا نسبت به حالت بدون EGR

- کاهش غلظت هوای ورودی و کاهش میزان در دسترس بودن اکسیژن نسبت به حالت بدون EGR

از آنجایی که هر دو مورد فوق تاثیر مستقیم روی میزان تولید آلاینده NOx دارند، با افزودن EGR میزان تولید آلاینده NOx در بویلر کاهش می یابد.

.

.

۵- مراجع

[1] Antonio Cavaliere, Mara de Joannon, Mild Combustion, Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 329–366

[2] Chiara Galletti, Alessandro Parente, Leonardo Tognotti, Numerical and experimental investigation of a mild combustion burner, Combustion and Flame 151 (2007) 649–664

[3] M.A.Habib, M.Elshafei, M.Dajani. influence of combustion parameters on NOx productionin an industrial boiler, Computers &Fluids 37 (2008) 12–23

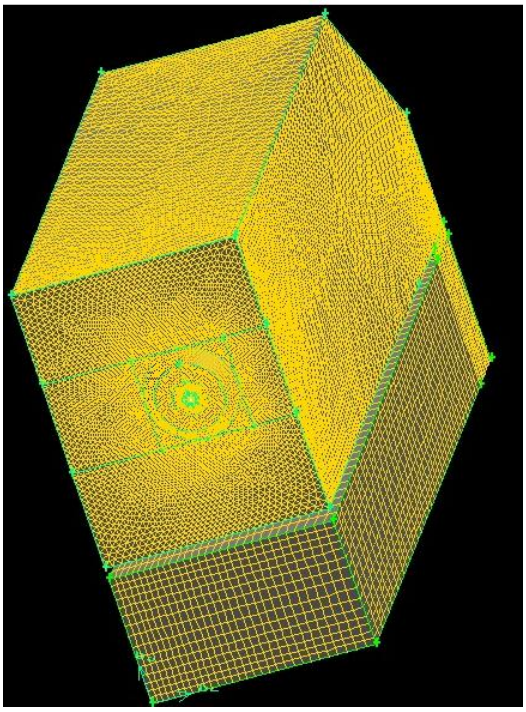
[4] ANSYS Fluent 12 user Manual, (2010)

[5] Zeldovich, Y. B., Sadovnikov, P. Y. and Frank-Kamenetskii, D. A., Oxidation of Nitrogen in Combustion, Translation by M. Shelef, Academy of Sciences of USSR, Institute of Chemical Physics, Moscow-Leningrad, 1947

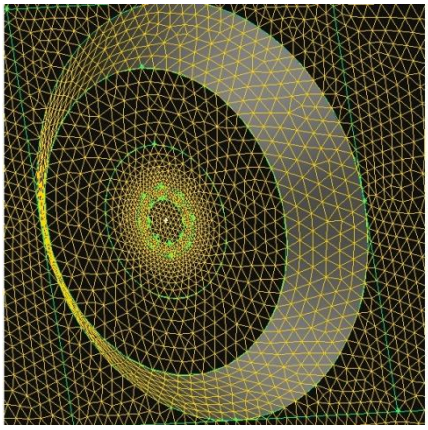
[6] Yaga M, Sasada K, Yamamoto T, Aoki H, Miura T. An eddy characteristic time modeling in LES for gas turbine combustor Mitsuru. In: Proceedings of 2000 international joint power generation conference, Miami Beach, FL, July 23–26; 2000. p. 1–6.

جدول۲- مشخصات بویلر[٤].

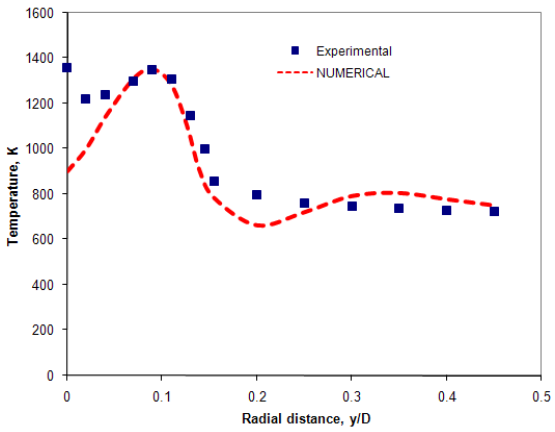
توان	80 MW
سوخت	CH_4
طول * عرض	4.579*12.541 m
ارتفاع	7.925 m
نرخ جریان سوخت	2.07 Kg/s
نرخ جریان هوا	40.23 Kg/s
زاویه swirl هوای ورودی	45^o
دمای هوای ورودی	300 ^{o}K
فشار بخار	51 bar
دمای بخار	538 ^{o}K



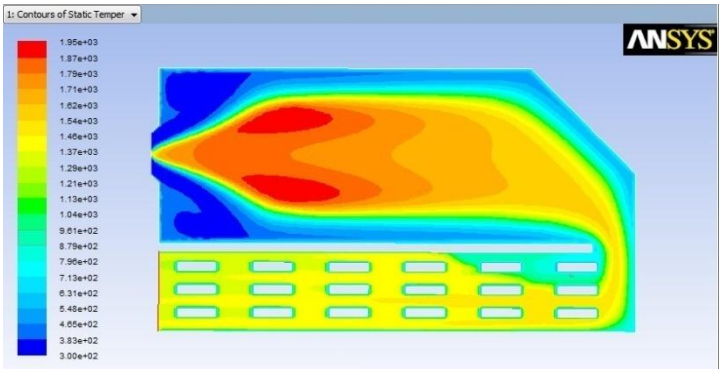
شکل (۱): شبکه محاسباتی دیگ



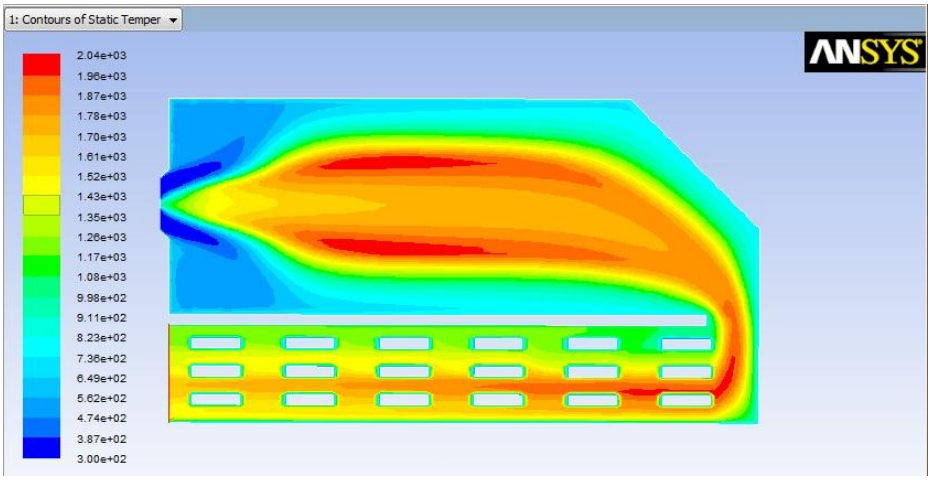
شکل(۲): شبکه محاسباتی مشعل



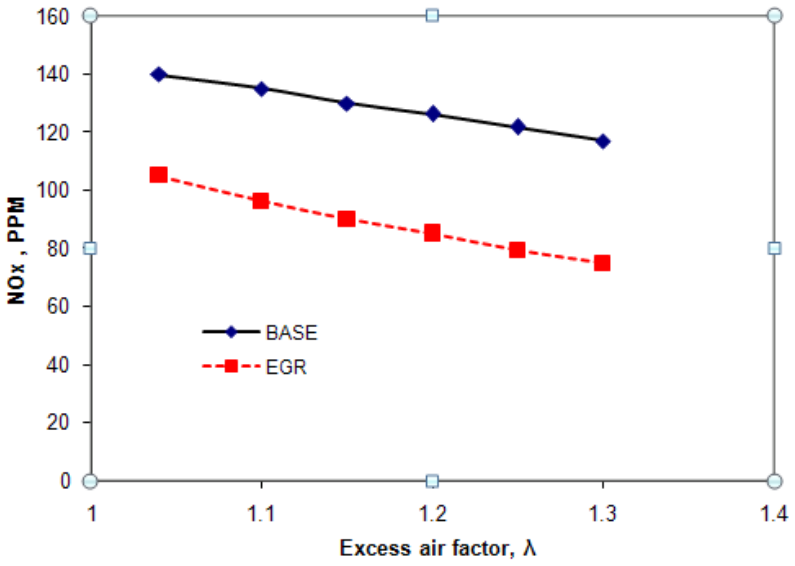
شکل (۳): مقایسه بین دمای داخل محفظه محاسبه شده توسط مدلسازی و تجربی[٦].



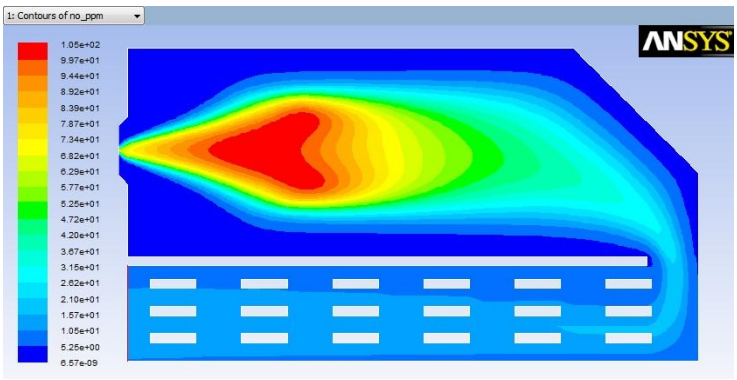
شکل (٤): کانتور دما برای حالت پایه



شکل (۵): کانتور دما برای حالت افزودن **EGR**



شکل (٦): مقایسه بین میزان آلاینده **NOx** تولید شده در حالت افزودن **EGR** وحالت پایه



شکل (۷): کانتور تولید**NOx** برای حالت افزودن **EGR**