

بررسی و مدل سازی نحوه انتشار آلودگی نوکس و کاهش آن در احتراق دما بالای پودر ذغالسنگ

محسن صفاری پور^۱، ویهونگ یانگ^۲، ولادمیرز بلاژیاک^۳، محمد حسن صفاری پور^۴

دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی کی تی اچ سوئد
(mohsensp@kth.se)

چکیده

در این تحقیق، احتراق دمای بالا به دلیل بازده بالای انرژی و استفاده از پیش گرمکن هوای ورودی با استفاده از گازهای دما بالای خروجی توأم با گرمکن اولیه به عنوان یکی از سیستم های احتراقی پاک و نو در جهان مطرح بوده و همواره محققین بسیاری از کلیه رشته های مهندسی را به خود معطوف ساخته است. به دلیل اهمیت احتراق ذغالسنگ در صنایع وابسته به تولید انرژی و نیز آلودگی زیست محیطی آن، نحوه انتشار آلودگی نوکس و وابستگی شدید به دمای آن در یک محفظه احتراقی دما بالای پودر ذغالسنگ به صورت آزمایشگاهی و مقایسه آن با داده های عددی مقایسه شده است. به منظور محاسبه معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و احتراقی از دینامیک سیالات محاسباتی و با فرض الگوریتم سیمپل به صورت کوپل با سرعت و فشار بهره گرفته شده است. برای بررسی آلودگی نوکس کلیه مکانیزم های شرکت کننده در آن از جمله نوکس حرارتی، سوختی، فوری و نیتريد اکسید میانی در نظر گرفته شده است. برای کاهش آلودگی نوکس از رقیق کردن هوای تزریق شده توسط اکسیدایزر با در صدهای مختلف بخار آب بهره گرفته شده است. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان دهنده کاهش آلودگی نوکس با افزایش بخار آب به دلیل کاهش دما در سراسر محفظه احتراقی است.

واژه های کلیدی: احتراق دما بالا، نوکس، دینامیک سیالات محاسباتی، پودر ذغالسنگ

۱- دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی کی تی اچ سوئد

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی کی تی اچ سوئد

۳- استاد، دانشگاه صنعتی کی تی اچ سوئد

۴- استادیار، دانشگاه شهید باهنر کرمان

Numerical simulation of NO_x emission in high temperature air combustion of pulverized coal

M. Saffari Pour ¹, W. Yang ², W. Blasiak ³, M.H. Saffari Pour ⁴

Ph.D. candidate, Royal Institute of Technology (KTH)

(mohsensp@kth.se)

Abstract

In this paper, according to the importance of the coal combustion in industrial factories and the effect of them on pollutant emission to the environment, NO_x emission in a high temperature air combustion (HTAC) chamber is numerically investigated. The computational fluid dynamic (CFD) approach is used to study the continuity, momentum and energy equations with considering the pressure-velocity coupling. In order to model the NO_x during the whole combustion chamber all of the mechanisms which are attended in NO_x pollutant mechanism such as thermal, prompt, fuel and N₂O intermediate are considered. It is inferred that the NO_x emission is highly dependent on temperature so, by increasing the temperature the NO_x emission will increase. During the calculations the preheated diluted air with steam in oxidizer injection is presented as a possible solution to reduce the temperature and NO_x emission. The comparison between the experimental and numerical data shows a good coincidence in the present case.

Key Words: HTAC, NO_x, CFD, Pulverised coal

1- Ph.D. Candidate, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden

2- Associate Professor, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden

3- Professor, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden

4- Assistant Professor, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

۱- مقدمه

بازده حرارتی واحدهای صنعتی یکی از مهمترین مشکلات پیش روی دانشمندان است. از آنجا که این صنایع همواره دارای تولید آلودگی هستند و این آلاینده ها اثرات مخربی بر محیط زیست دارند کنترل این آلودگی ها بسیار مهم و حیاتی و به یک مسئله بین المللی تبدیل شده است. احتراق صنعتی یکی از مسائل جامع و پر کاربرد در صنعت بوده که از این واحدهای احتراقی می توان به بویلرها، کوره ها و محفظه های احتراقی اشاره کرد.

تولید و کنترل نوکس (NO_x) و ساکس (SO_x) به عنوان عمده آلاینده های زیست محیطی همواره گریبانگیر این واحدهای صنعتی بوده است. در اوایل سال ۱۹۶۵ میلادی آلاینده نوکس به عنوان عمده آلاینده در احتراق ذغالسنگ شناخته و کلیه واحدهای احتراقی مؤظف به رعایت قوانین و استفاده از تجهیزات خاصی به منظور کاهش آن شدند. از این تدابیر ویژه می توان به استفاده از مشعل های خاص و تکنیک های نوین احتراقی اشاره کرد.

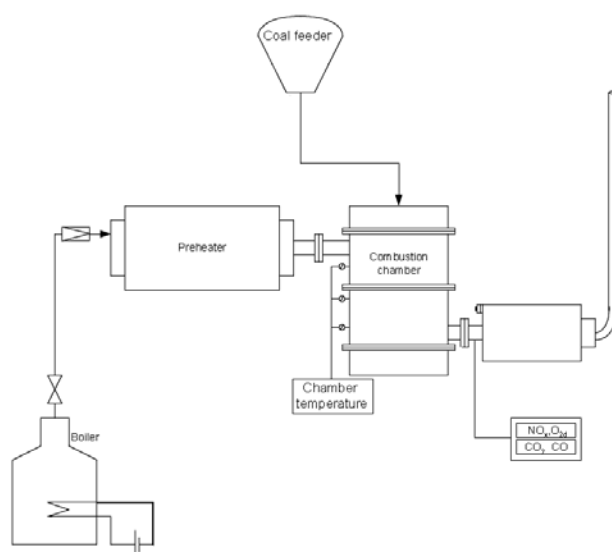
تکنیک های نوین احتراقی عبارتند از: احتراق بدون شعله [1]، احتراق متوسط یا شدید کم رقیق شده اکسیژن [2] و احتراق دما بالای هوا [3]. احتراق دما بالای هوا ابتدا برای سوخت های حالت گاز استفاده و سپس به دلیل بازده بالای آن به سوخت های فسیلی از جمله ذغالسنگ تعمیم داده شد.

در طی سال های متمادی کارهای بسیار و شایان تقدیری روی فن آوری احتراق دما بالا صورت گرفته است که از آن ها می توان به کار ویهونگ یانگ و بلاژیاک [4] که روی مدل ریاضی صدور نوکس شعله معطوف بوده است اشاره کرد. کیگا و همکاران [5] روی خصوصیات احتراقی پودر ذغالسنگ تحقیقاتی انجام داده اند. لیله و همکاران [6] کار آزمایشگاهی روی جت سوخت دما بالا انجام دادند. نبیلی و بلاژیاک [7] محاسبات عددی بر روی نوکس ایجاد شده در یک کوره صنعتی و همچنین استفاده از کامپوزیت بازیاب انرژی را مورد بررسی قرار دادند.

داده های آزمایشگاهی موجود از این محفظه احتراقی و تطابق داده های دمایی اندازه گیری شده با داده های عددی باعث شد که پژوهش عددی حاصل سعی بر محاسبه نوکس حاصل از محفظه احتراقی استوانه ای شکلی که هوای دمیده شده به محفظه احتراقی با درصدهای مختلفی از ترکیب بخار آب و هوا رقیق شده است استوار باشد.

۲- داده های آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: پیش گرمکن، بویلر، تغذیه کننده ذغال و محفظه احتراقی که در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. ارتفاع محفظه احتراقی ۲٫۵ متر و قطر آن ۰٫۴ متر بوده و حجم محفظه احتراقی ۰٫۲۸ متر مکعب به صورت استوانه ای بوده که پیش از هر بار شروع تست تجهیزات مورد نیاز ۱۰ الی ۱۲ ساعت گرم می شوند. ۲ ترموکوپل که دارای خاصیت جمع آوری و آنالیز نوع گاز می باشند در ورودی و خروجی این محفظه احتراقی نصب شده اند. ترموکوپل ها مجهز به سیستم خنک کننده بوده و در فاصله ۲۰۰ میلی متری جداره عایق دیواره نصب شده اند. تمامی فرایند احتراق در ارتفاع ۱٫۷ متری این محفظه احتراقی صورت می گیرد.



شکل ۱: تجهیزات آزمایشگاهی

۳- مدل سازی ریاضی

به منظور حل جریان سیال و مدل سازی احتراق از دینامیک سیالات محاسباتی با کمک نرم افزار فلوئنت ۱۲.۰ [8] بهره گرفته شده است. هندسه مربوطه با ۲۳۸۵۲۶ مش تولید و با استفاده از الگوریتم سیمپل به صورت کوپل با سرعت و فشار در سرتاسر دامنه محاسباتی مورد تحلیل قرار گرفته است. برای محاسبه بار تشعشعی (RTE) از روش جهات مجزا (DOM) به ازای ضخامت های اپتیکی مختلف بهره گرفته شده است [9]. از آنجا که هندسه محفظه احتراقی و نیز جریان حاکم بر مسئله سه بعدی و مغشوش می باشد برای مدل توربولانسی احتراق ناویر استوکس متوسط رینولدزی (RANS) به همراه مدل کی-اِپسیلون $k-\epsilon$ می باشد. که به صورت معادلات زیر تعریف شده اند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho V k) = \text{div}\left(\frac{(\mu + \mu_t)}{\sigma_k} \text{grad} k\right) + G - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \text{div}(\rho V \epsilon) = \text{div}\left(\frac{(\mu + \mu_t)}{\sigma_\epsilon} \text{grad} \epsilon\right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

۴- مدل نوکس و احتراق

برای بررسی جامع مدل نوکس از کلیه مکانیزم های شرکت کننده نوکس در این تحقیق استفاده شده است. نوکس حرارتی با مکانیزم زلدوویچ [10] به صورت معادلات زیر که با ضرایب خاص نرخ واکنش ارائه شده مدل شده است:



$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{1}{1 + \frac{k_2[NO]}{k_3[O_2] + k_5[OH]}} \times \left[2k_1[O][N_2] - \frac{2k_2}{k_3[O_2] + k_5[OH]} \times (k_4[O][NO]) + k_6[H][NO] \right] \quad (6)$$

$$k_i = A_i T^{B_i} \exp\left(\frac{-C_i}{T}\right) \quad (7)$$

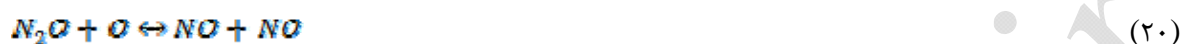
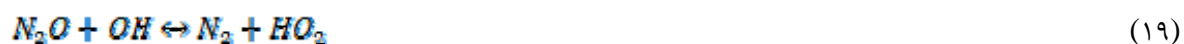
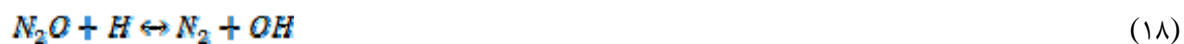
$$[O] = 36.64 \times T^{1/2} \times \exp\left(\frac{-27125}{T}\right) \times [O_2]^{1/2} \text{ mol/m}^3 \quad (8)$$

$$[OH] = 2.129 \times 10^2 \times T^{-0.67} \times \exp\left(\frac{-4595}{T}\right) \times [O]^{1/2} [H_2O]^{1/2} \text{ mol/m}^3 \quad (9)$$

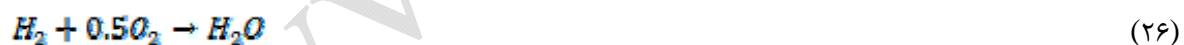
و نوکس فوری بر اساس مدل دی سوئته [11] به صورت زیر ارائه شده است:



نوکس تولیدی از طریق مکانیزم نیتريد اکسيژن که معمولاً در دماهای بالای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد تولید می شود به صورت معادلات زیر که M بیانگر جسم سوم واسط در معادلات به صورت زیر مدل شده است [11]:

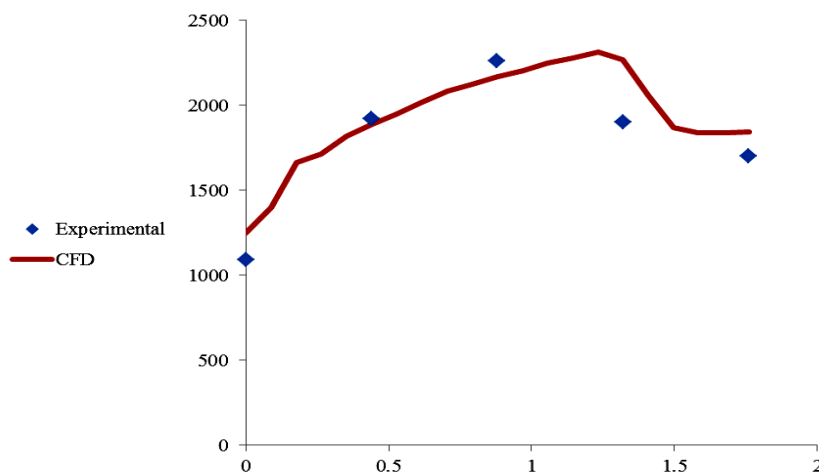


معادلات به کار رفته در ذغال به صورت زیر بوده که محاسبات احتراقی و شیمیایی موجود در این تحقیق از نوع پخشی Finite Rate/Eddy با محاسبه فرض تک گام در فرایند devolatilization در نظر گرفته شده است.



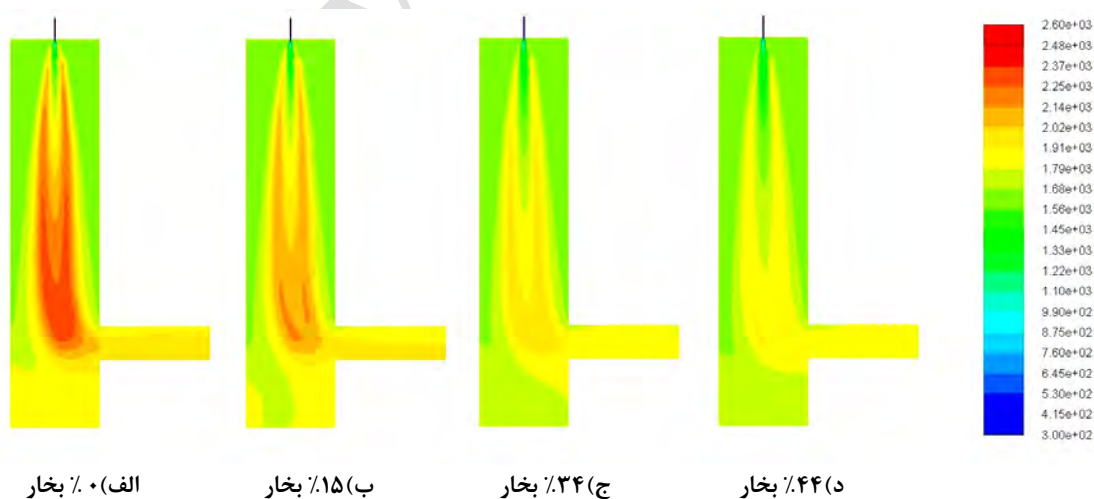
۵- نمودارها و نتایج

شکل شماره ۲ به منظور اعتبار سنجی داده های عددی و تطابق آن ها با داده های آزمایشگاهی ارائه شده است. این شکل نشان دهنده پروفیل دما در فضای مفید احتراقی به ارتفاع ۱٫۷ متر که ماکزیمم دمای حاصل برای هوای خالص در حدود ۲۳۰۰ درجه سانتی گراد است ترسیم شده است. همانطور که در شکل مشخص شده تطبیق قابل قبولی به نمایش در آمده و اختلاف جزئی بین داده ها ناشی از دقت دستگاه های اندازه گیری دما و نیز دقت محاسبات می باشد.



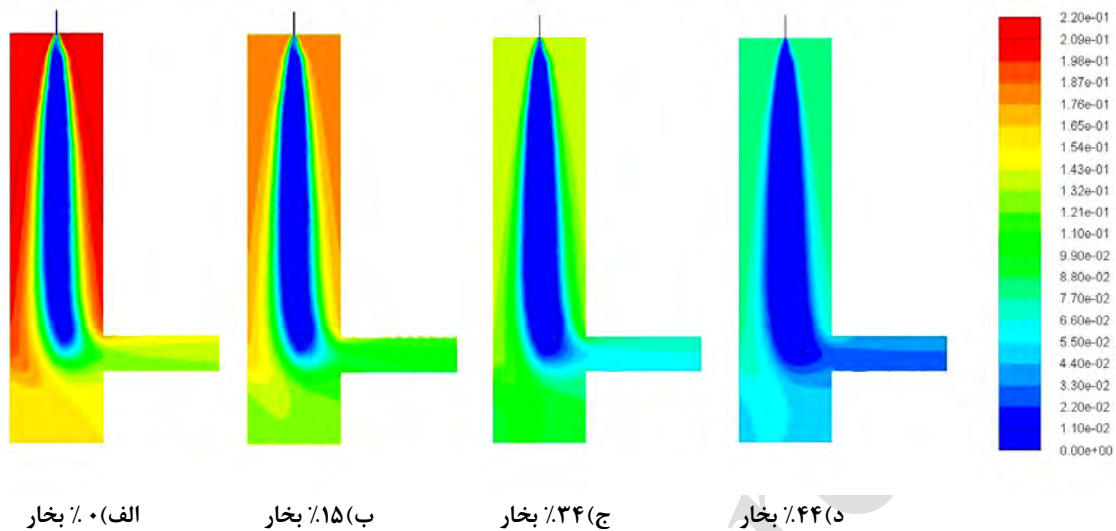
شکل ۲: اعتبارسنجی داده ها

شکل ۳ نشان دهنده کانتورهای دما درون محفظه احتراقی است. همانطور که به وضوح از روی شکل های ۳ (الف تا د) قابل تشخیص است فن آوری احتراقی دمای بالا دارای پخش دمایی یکنواخت تری نسبت به سایر انواع دیگر بر خوردار است. حداکثر دمای ایجاد شده در مرکز محفظه احتراقی متمرکز بوده و بیشترین دما مربوط به شکل الف) که حاوی هوای خالص در ساختار اکسیدایزر است می باشد. افزایش میزان بخار در ساختار تزریقی اکسیدایزر باعث کاهش قابل ملاحظه دما می شود.



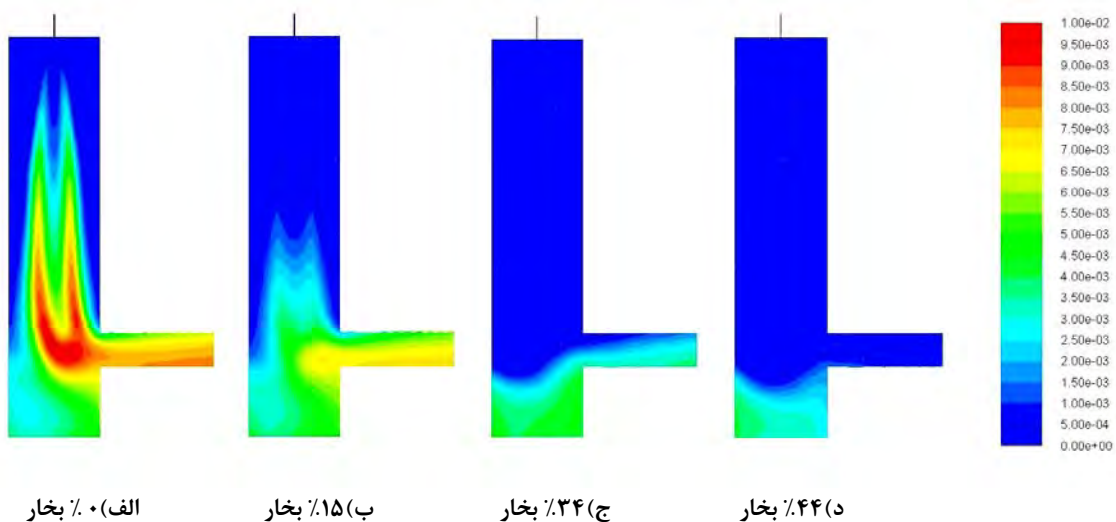
شکل ۳: کانتورهای دما در فضای احتراقی

در شکل ۴ میزان تجمع اکسیژن در سراسر محفظه احتراقی ترسیم شده است. و نواحی کم اکسیژن نشان دهنده نواحی حرارت بالای ایجاد شده در اطراف شعله است. نواحی اطراف نازل نشان دهنده تزریق مقادیر متفاوتی از ترکیب هوای پیش گرم شده به همراه بخار آب است.



شکل ۴: کانتورهای تمرکز اکسیژن در فضای احتراقی

شکل ۵ حاوی کانتورهای نشان دهنده آلایندة نوكس می باشد که به صورت کانتور تمرکز NO ترسیم شده و مشخص کننده کاهش صدور آلایندة نوكس با تزریق بیشتر بخار آب می باشد. به دلیل کاهش قابل ملاحظه دمای نشان داده شده در شکل ۳ میزان صدور نوكس در شکل شماره ۵ از حالت الف) تا حالت د) کاهش یافته است. و با افزودن مقدار بخار میزان بیشتری از این آلایندة در انتهای محفظه ته نشین خواهد شد. همچنین شکل ۵ حاوی این مطلب مهم است که آلایندة نوكس در نواحی اطراف و پایین دست شعله تشکیل می گردد.



شکل ۵: کانتور تمرکز آلایندة نوكس در فضای احتراقی

۶- نتیجه گیری

با انجام تحقیق حاضر، احتراق دما بالای ذغالسنگ با فرایند تک گام devolatilization مدل شد و مشخص شد که سیستم احتراقی دما بالا، یکی از فن آوری های جدید در زمینه احتراق سوخت های فسیلی بوده که دارای بازده انرژی بسیار بالا و نیز کاهش چشمگیر آلاینده هایی نظیر نوکس به دلیل استفاده از تکنیک های نوین از جمله بازیاب کننده حرارت و پیش گرم کن است. با افزایش میزان درصد بخار پیش گرم شده به عنوان تکنیک کاهش آلاینده ها به اکسیدایزر باعث کاهش دما و البته کاهش آلاینده نوکس شده ایم. البته کارایی فرایند کامل احتراقی نیازمند توجه کافی به میزان این بخار و نحوه تزریق آن دارد که در صورت عدم رعایت نکات فوق باعث نتایج معکوسی نظیر خوردگی و از بین رفتن تجهیزات تزریق سوخت و هوا می شود. نکته قابل توجه این است که به دلیل تشکیل نوکس در نواحی پایین دست جریان و شعله، مقداری از گازهای آلاینده نوکس در انتهای محفظه احتراقی باقی خواهد ماند که نیازمند تدابیر خاصی به منظور تخلیه این آلاینده از محفظه احتراقی هستیم. تکنولوژی احتراق دما بالا به دلیل پیچیدگی بالا و منحصر به فرد خود نیازمند کار و تحقیق بیشتر روی آن بوده تا به جنبه های بیشتری در مورد صدور آلاینده ها در آن دست یافت.

مراجع

- [1] Wüning, J.A., Wüning, J.G., Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation, Prog. Energy Combust. Sci. 23 (1997) 81-94.
- [2] Cavaliere, A., Joannon, M.D., Prog. Energy Combust. Sci. 2004, 30, 329-366.
- [3] Katsuki, M., Hasegawa, T. Proc. Combust. Inst. 1998, 27, 3135-3146.
- [4] Yang, W., Blasiak, W., Mathematical modeling of NO emissions from high-temperature air combustion with nitrous oxide mechanism, Fuel Processing Technology 86 (2005) 943-957.
- [5] Kiga T., Yoshikawa, K., Sakai, M., Mochida, S. (2000). Characteristics of Pulverized Coal Combustion in High-Temperature Preheated Air. Journal of Propulsion and Power. Vol. 16, Issue 4 pp. 601- 605.
- [6] Lille, S., Blasiak, W., Jewartowski, M. (2005). Experimental Study of The Fuel Jet Combustion in High Temperature and Low-Oxygen Content Exhaust Gases. Energy. Vol. 30, pp.373-384.
- [7] Rafidi, N., and Blasiak, W., Heat transfer characteristics of HTAC heating furnace using regenerative burners, Journal of Applied Thermal Engineering 26 (2006) 2027-2034.
- [8] Ansys. Ansys FLUENT 12.0 User's guide; 2009.
- [8] Modest, M.F., Radiative Heat Transfer, Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [10] Baulch, D.L., Drysdall, D.D., and Horne, D.G., Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions, Butterworth, UK, 1973.

[11] De Soete, G.G., Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation from Fuel Nitrogen, Proc. 15th Int. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1093–1102, Tokyo, Japan, 1975.

www.Koureh.ir