



مطالعه عددی اثر رقت سوخت بر عملکرد حرارتی یک کوره صنعتی در دمای

معمولی و بسیار بالای هوای احتراق

کیومرث عباسی خزائی و زهرا عباسی خزائی - شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، شرکت بهره برداری نفت و گاز غرب، کرمانشاه

بیژن عباسی خزائی - گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

E-mail: kns_abbasi@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، مقایسه پیش بینی پاره ای از نتایج تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی یک کوره صنعتی (به کمک یک برنامه کامپیوتری نوشته شده به وسیله نویسندگان)، تحت بکارگیری یک سوخت رقیق (شامل ۵۰٪ گاز طبیعی و ۵۰٪ گاز نیتروژن) در شرایط یک احتراق معمولی (هوای با دمای ۱۲۷۳ درجه کلوین و غلظت ۲۱٪ اکسیژن) و احتراق با هوای بسیار داغ و رقیق (هوای با دمای ۱۲۷۳ درجه کلوین و ترکیب ۱۰٪ اکسیژن و ۹۰٪ نیتروژن) مورد بررسی قرار می گیرد. طی این تحقیق معلوم گردیده که بکارگیری همزمان سوخت رقیق و هوای داغ و رقیق، بهترین شرط برای برقراری خصوصیات منحصربفرد جنبه های حرارتی-انرژی از جمله: حذف نقاط اوج درجه حرارت همراه با ارتقاء یکنواختی پروفایل آن بدلیل رخداد تدریجی واکنش احتراق و بالتبع آن افزایش وسعت و یکنواختی میدان تولید انرژی حرارتی و انتقال آن و در نتیجه افزایش بازده کوره (صرفه جوئی قابل توجه در مصرف سوخت/انرژی) فراهم می گردد. طول عمر کوره، کاهش اندازه کوره در طراحی یک کوره جدید (بدلیل حذف بخش انتقال حرارت جابجائی) و افزایش میزان جریان سیال گرم شونده در اصلاح عملکرد یک کوره موجود از شرایط احتراق معمولی به شرایط احتراق پیشنهادی این مطالعه، از جمله دیگر نتایج کیفی حاصله می باشند.

واژه های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، احتراق، سوخت رقیق، هوای داغ و رقیق، کوره، صرفه جوئی انرژی.

Numerical Study of Fuel Dilution Effect on the thermal Performance of a Furnace with Highly Preheated and Diluted Air

K. Abbasi Khazaei and Z. Abbasi Khazaei ' West Oil and Gas Company, Zan Boulevard, Kermanshah
B. Abbasi Khazaei, Dept. of Mech. Eng., the Faculty of Engineering, Razi University

Abstract: This paper presents some of the predicted results of the computational fluid dynamic "CFD" numerical study for the effects of using a diluted fuel (50% natural gas and 50% N₂) on the energy-thermal features of an industrial furnace under several cases of conventional combustion (air with 21% O₂ and 1273 K) and the highly preheated and diluted air combustion "HPDAC" (air with 10% O₂ and 90% N₂ and 1273 K) conditions using a computer program written by authors. It was found that by applying a combined diluted fuel and oxidant instead of their uncombined and/or undiluted states, the best condition is obtained for the establishment of thermal-energy HPDAC's main unique features. The HPDAC technology also can result in smaller chamber size for processing the same material or increasing productivity for the same furnace size.

Keywords: CFD, combustion, highly preheated and diluted air, diluted fuel, furnace, energy saving.

۱- مقدمه

در تکنولوژیهای معمول احتراق، افزایش راندمان حرارتی کوره ها (بدلیل افزایش دمای احتراق) منجر به افزایش انتشار آلاینده های زیست محیطی و به عبارتی دیگر، کاهش انتشار آلاینده های زیست محیطی (بدلیل کاهش دمای احتراق) به قیمت کاهش راندمان حرارتی کوره ها تمام می شود. لذا تحقیقات و بررسیهای بعمل آمده (طی سالهای ۲۰۰۱-۱۹۹۳) جهت تحقق همزمان الزامات جهانی انرژی-زیست محیطی و در قالب رفع تناقض و تضاد بین افزایش راندمان حرارتی کوره ها و کاهش انتشار آلاینده های زیست محیطی تا حد استانداردها، منجر به تولد یک تکنولوژی جدید تحت عنوان "احتراق با هوای بسیار داغ و رقیق (highly preheated and diluted air combustion HPDAC) گردید. این تکنولوژی جدید مبتنی بر بازیافت حرارت از گازهای خروجی کوره و استفاده از آن جهت پیشگرم نمودن هوای احتراق بسیار رقیق شده (به وسیله گازهای خروجی از کوره، نیتروژن، آرگن یا هر گاز خنثی دیگر) تا درجه حرارتیهای حداقل بالاتر از دمای خود اشتعالی سوخت می باشد. تحت بکارگیری این تکنولوژی جدید، تحقق همزمان الزامات جهانی انرژی-زیست محیطی [۴-۱] در قالب برقراری خصوصیات ذیل الذکر منحصراً بفرود احتراق HPDAC صورت می پذیرد:

- صرفه جوئی درمیزان مصرف انرژی به میزان ۳۰ تا ۶۰ درصد نسبت به تکنولوژیهای معمول احتراق (هوای با دما و غلظت معمولی)
- کاهش انتشار آلاینده های زیست محیطی (مانند CO_2 و NO_x) به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد نسبت به تکنولوژیهای معمول احتراق (هوای با دما و غلظت معمولی)
- کاهش اندازه تجهیزات (کوره) به میزان حداقل ۲۵ درصد نسبت به تکنولوژیهای معمول احتراق (هوای با دما و غلظت معمولی) و به دلیل یکنواختی پروفایل درجه حرارت و

حذف بخش انتقال حرارت جابجائی

- ارتقاء یکنواختی پروفایل درجه حرارت و کنترل آن و همچنین افزایش حجم و یکنواختی فلاکس حرارتی در تجهیزات (کوره)
- امکان بکارگیری سوختهای با ارزش حرارتی بسیار پایین در شرایط احتراق پایدار (بدون نیاز به تثبیت کننده شعله)
- سهولت تولید بخار با فشار و دمای بالا در بویلرها (به دلیل عدم وجود یا تولید بسیار اندک آلاینده های اسیدی و گرد و غبار که از جمله عوامل حمله به لوله های بویلرها می باشند)

علیرغم گذشت حدوداً یک دهه از عمر این فناوری در حال حاضر چالشهای فراوانی در مسیر توسعه آن مطرح می باشد [۱ و ۲]. این چالشها که عمدتاً مبتنی بر عدم تحقق فهم کامل این تکنولوژی و ارائه مدل‌های مناسب جهت توضیح فرآیندهای حاکم بر آن بوده، پایه و بنیان ادامه تحقیقات از جمله مطالعه حاضر را تشکیل می دهد. تحت بررسی حاضر، نتایج حاصل از مدلسازی و شبیه سازی (با نوشتن یک کد دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به وسیله نویسندگان) عددی بکارگیری یک سوخت رقیق (شامل ۵۰٪ گاز طبیعی و ۵۰٪ گاز نیتروژن) در شرایط احتراق با هوای بسیار داغ و رقیق (هوای با دمای ۱۲۷۳ درجه کلون و ترکیب ۱۰٪ اکسیژن و ۹۰٪ نیتروژن) و یک احتراق معمولی (هوای با دمای ۱۲۷۳ درجه کلون و غلظت ۲۱٪ اکسیژن) به لحاظ کمی و کیفی و بدون اشاره به نتایج مرتبط با جنبه های زیست محیطی، صرفاً از دیدگاه حرارتی-انرژی مورد بررسی قرار می گیرد. برای اولین بار و طی این تحقیق معلوم گردیده که بکارگیری

شعله) بدلیل انجام بطنی و گسترده واکنش احتراق در میدان جریان و بالتبع آن افزایش بازده حرارتی کوره، همچنین کاهش/حذف نقاط اوج درجه حرارت و در نتیجه کاهش تولید NO_x را نیز باعث گردد. این کنترل و کاهش، در قالب انجام یک احتراق HPDAC از طریق رقیق نگهداشتن هوای احتراق (پایین نگه داشتن میزان اکسیژن در آن تا حدود ۵ درصد و کمتر) به کمک بازچرخانی بخشی از گازهای احتراق و تزریق آن به هوای احتراق ورودی صورت پذیرفته که در نتیجه تولید آلاینده NO_x تحت دماهای بسیار بالا و غلظتهای بسیار پایین اکسیژن (بدلیل رقت هوا و افت اوج درجه حرارت شعله) به حداقل ممکن خود می رسد. هر چند تحت احتراق HPDAC، ماکزیمم درجه حرارت احتراق، ممکن است مشابه و حتی کمتر از ماکزیمم درجه حرارت احتراق در شرایط معمولی احتراق (در شرایط دما و غلظت معمولی هوا) باشد و به همین دلیل کاهش تولید آلاینده NO_x میتواند قابل توجه باشد لکن همانطور که از شکل (۲) [۲] ملاحظه می گردد، در مجموع بالا بودن حجم شعله و یکنواختی پروفایل دمایی (تحت هوای احتراق با دمای بسیار بالا و غلظت بسیار پایین) نسبت به یک شعله کوچک و متمرکز (در شرایط احتراق معمولی) می تواند باعث افزایش بازده حرارتی یک احتراق HPDAC نسبت به یک احتراق معمولی باشد. دیگر مزیت این تکنولوژی نسبت به یک احتراق معمولی آنستکه چنانچه دمای هوا بالاتر از دمای خود اشتعالی سوخت باشد، آنگاه در محدوده قابلیت احتراق سوخت، بدون نیاز به استفاده از تثبیت کننده شعله، احتراقی پایدار خواهی خواهیم داشت.

۳- مدل سازی و شبیه سازی کوره تحت شرایط احتراق

معمولی و احتراق HPDAC

اساس این مدل، عبارتست از ارائه، تنظیم و حل معادلات بقای جرم، مومنتوم، گونه های شیمیائی و انرژی، همراه با

همزمان سوخت رقیق و هوای داغ و رقیق، بهترین شرط احتراق برای برقراری خصوصیات ذکر شده منحصر بفرد احتراق HPDAC می باشد. لازم الذکر است که نتایج حاصل از مدلسازی و شبیه سازی عددی بکارگیری یک سوخت معمولی (گاز طبیعی) در شرایط احتراق HPDAC (هوای با دمای ۱۲۷۳ درجه کلون و ترکیب ۱۰٪ اکسیژن و ۹۰٪ نیتروژن) و احتراق معمولی (هوای با دمای محیط و ۱۲۷۳ درجه کلون و غلظت ۲۱٪ اکسیژن) که قبلاً و به توسط کد CFD مذکور صورت پذیرفته [۱۰-۵]، انطباق کمی و کیفی بسیار خوبی با نتایج حاصل از تحقیقات دیگر محققین داشته است.

۲- مفهوم اساسی تکنولوژی احتراق با هوای بسیار داغ و رقیق و بکارگیری آن در کوره ها

همانطور که گفته شد این تکنولوژی جدید مبتنی بر بازیافت حرارت از گازهای خروجی کوره و استفاده از آن جهت پیشگرم نمودن هوای احتراق بسیار رقیق شده (به وسیله گازهای خروجی از کوره، نیتروژن، آرگن یا هر گاز خنثی دیگر) تا درجه حرارتهای حداقل بالاتر از دمای خود اشتعالی سوخت می باشد. مفهوم عملکرد یک کوره نیمه صنعتی HPDAC طی شکل (۱) که در آن و به صورت پریودیک سیکلهای A و B جهت برقراری شرایط احتراق مذکور، بطور متناوب تعویض و تکرار می گردند [۱۱ و ۱۲]. در حالت احتراق معمولی، پیش گرم کردن هوا باعث ایجاد ناهمگونی توزیع درجه حرارت و همچنین افزایش نقاط اوج درجه حرارت (بدلیل انجام واکنشهای سریع و ناگهانی محلی در میدان جریان) و در نتیجه کاهش بازده حرارتی کوره و افزایش تولید NO_x در آن گردیده، لکن احتراق کنترل شده می تواند ضمن ایجاد همگونی هر چه بیشتر توزیع درجه حرارت (همگونی بیشتر فلاکس حرارتی

استفاده گردیده است. در این مقاله ارائه نتایج حاصل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای یک نیم سیکل عملکرد مشعل، صرفاً در راستای اثبات قدرتمندی بکارگیری کد CFD نوشته شده به وسیله نویسندگان در حل مسئله مد نظر بوده، لذا جهت اطلاع بیشتر از جزئیات، مبانی و معادلات حاکم بر مدل، می‌توان به مراجع [۱۴ و ۱۵] مراجعه نمود.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

با استفاده از نرم افزار طراحی شده، کوره با مشخصات مندرج در مرجع [۱۳]، برای یک سوخت رقیق (شامل ۵۰٪ گاز طبیعی و ۵۰٪ کاز نیتروژن) در دو حالت احتراق ۱- تحت غلظت معمولی و دمای بسیار بالای هوا ۲- تحت غلظت پائین و دمای بسیار بالای هوا شبیه‌سازی گردیده و با نتایج حاصل از تحقیقات قبلی برای یک سوخت معمولی [۱۰-۵] مقایسه می‌گردد. بخشی از نتایج طی جدول (۱) و اشکال (۱۲-۴) ارائه شده است.

از مقایسه نتایج مشهود حاصل از بکارگیری یک سوخت رقیق در احتراق تحت هوای داغ و رقیق نسبت به یک احتراق معمولی طی جدول ۱ و اشکال (۱۲-۴)، حذف نقاط اوج درجه حرارت/انتقال حرارت تشعشعی (متناظر با افزایش طول عمر کوره) همراه با ارتقاء یکنواختی پروفایل آنها بدلیل رخداد تدریجی واکنش احتراق و بالتبع آن افزایش وسعت و یکنواختی میدان تولید انرژی حرارتی و انتقال آن و در نتیجه افزایش بازده کوره (صرفه جوئی قابل توجه در مصرف سوخت/انرژی) که همانا کاهش اندازه یا قابلیت افزایش جریان سیال گرم شونده بوده، فراهم می‌گردد. طول عمر کوره، کاهش اندازه کوره در طراحی یک کوره جدید (بدلیل حذف بخش انتقال حرارت جابجائی) و افزایش میزان جریان سیال گرم شونده در اصلاح عملکرد یک کوره موجود از شرایط احتراق معمولی به شرایط

شرایط مرزی مناسب که به آنها معادلاتی دیگر جهت تبیین پروسه های انتقال درهم و انتقال انرژی تشعشعی (ارائه مدل درهم و مدل تشعشع) بوده، اضافه می‌گردد. علاوه بر آن برای ارائه معادله بقای جرم کلیه گونه های شیمیائی (سوخت، هوا و محصولات احتراق)، لازم است که مدلی تحت عنوان مدل احتراق درهم که مبین چگونگی عمل احتراق سوخت با ماده اکسید کننده (اکسیژن یا هوا) در یک جریان درهم بوده، ارائه گردد. سیستم منتج از اعمال فوق، عبارتست از یک سری معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی بیضوی که با اعمال فرضیاتی در خصوص نحوه توزیع متغیرها بین نقاط (گره) شبکه و استفاده از انتگرالگیری روی یک ناحیه مشخص، شکل انفصال یافته معادلات حاکم بر مدل و نهایتاً فرمول جانشینی مورد استفاده در بکارگیری روشهای تکراری جهت حل مسئله (در قالب یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن) و بهره‌گیری از نرم افزار MATLAB، بدست می‌آید.

این مدل‌سازی برای یک کوره عمودی استوانه‌ای [۱۳] (با طول و قطری به ترتیب معادل ۹/۲۷۲ و ۳/۰۴۸ متر که گرمای اشتعال ۸/۹۳۹ مگاوات را از طریق یک مشعل منفرد مستقر در بخش مرکزی کف کوره، به سیالی که از درون ۴۸ عدد لوله که بطور متقارن و در راستای طولی و در همسایگی جداره آن آرایش یافته اند، انتقال حرارت می‌نماید) و در یک سیستم دو بعدی با تقارن محوری انجام گردیده است (مطابق با شکل ۳).

متغیرهای اصلی در معادلات هیدرودینامیکی، ورتیسیتی و تابع جریان بوده و به منظور برآورد خواص انتقال در یک جریان درهم، از یک فرمولاسیون منتج از تئوری جریان جت درهم استفاده شده است. برای تحلیل فرآیند انتقال جرم و احتراق، یک واکنش تک مرحله‌ای و آنی مد نظر قرار گرفته و جهت برآورد ترم منبع در

معادله انرژی، از مدل تشعشع تحت عنوان four-flux

کنفرانس ملی احتراق ایران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، ۱-۲ اسفند ماه ۱۳۸۴، ص ۱۲۷.

[۶] عباسی خزائی، ک.، حمیدی، ع.ع.، رحیمی، م. "مدلسازی عددی کوره های صنعتی عمل کننده با هوای احتراق بسیار داغ و رقیق با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی"، اولین کنفرانس ملی کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در مهندسی شیمی، دانشگاه رازی کرمانشاه، ۲۶-۲۵ اردیبهشت ماه ۱۳۸۷، ص ۶۸.

[7] Sadrameli, M. and Abbasi Khazaei, K., "Advanced Modeling and Simulation of Industrial Boilers", International Journal of Engineering (IJE), Vol. 11, No.2, 61-72, 1998.

[8] Abbasi Khazaei, K., Hamidi, A.A. and Rahimi, M., "The Numerical Modeling and Simulation of the Highly Preheated and Diluted Air Combustion Furnaces", Fuel, Energy and Environment National congress, Materials and Energy Research Center, 27-29 May 2008, pp.71.

[9] Abbasi Khazaei, K., Hamidi, A.A. and Rahimi, M., "Numerical Modeling and Simulation of Highly Preheated and Diluted Air Combustion Furnaces," International Journal of Engineering (IJE), Vol. 22, No.2, 107-118, 2009.

[10] Abbasi Khazaei, K., Hamidi A.A. and Rahimi M., "CFD Modeling Study of High Temperature and Low Oxygen Content Exhaust Gases Combustion Furnaces", Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE), Vol. 29, 2010 (accepted)

[11] Mortberg, M., "Study of Gas Fuel jet Burning in Low Oxygen Content and High Temperature Oxidizer", Ph. D. Dissertation., Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005.

احتراق پیشنهادی این مطالعه، از جمله دیگر نتایج کیفی حاصل می باشند. مقایسه کمی نتایج حالت اول با نتایج تجربی/صنعتی حاصل از مدل ناحیه ای [۱۳ و ۱۴] و مقایسه کیفی نتایج حالت دوم و سوم با نتایج دیگر یافته های علمی [۱۱ و ۱۳]، حاکی از انطباق بسیار خوب نتایج و در نتیجه تصدیق مدلسازی و شبیه سازی می باشد.

۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر مسعود رحیمی (عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی دانشگاه رازی) و جناب آقای دکتر علی اصغر حمیدی (عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی دانشگاه تهران)، تشکر و قدردانی می گردد.

۶- مراجع

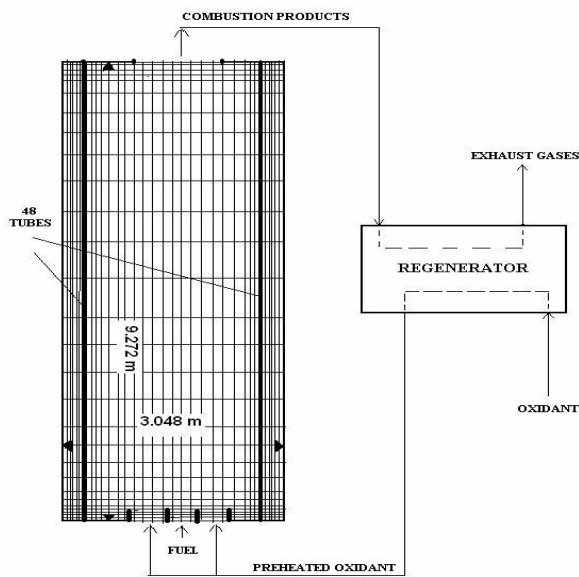
[1] Gupta, A.K., "Technological Evolution, Challenges and Future Prospects for the Application of HiTAC in the HiCOT Project", Proceeding of the Forum on High Temperature Air Combustion Technology., pp.71-81, 2001.

[2] Morita, M., "Optimal Design for High Performance Industrial Furnace Applied High Temperature Air Combustion Technology", Proceeding of 2000 International Joint Power Generation Conference(IJPGC2000-15030), 2000.

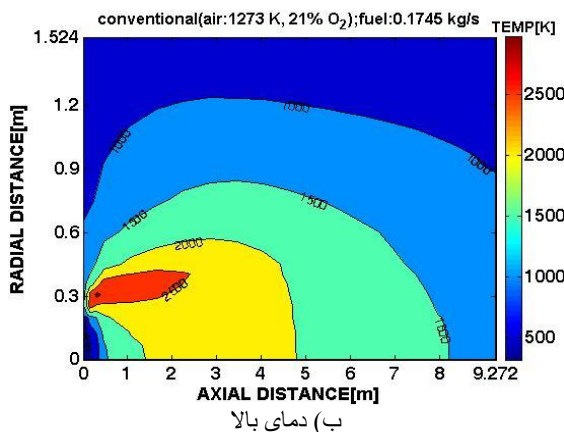
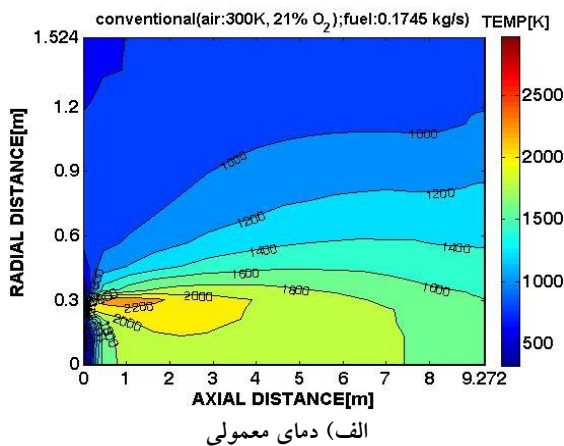
[3] Gupta, A.K., "Flame Characteristics and Challenges with High Temperature Air Combustion", Proceeding of International Joint Power Generation Conference(IJPGC2000-15087), 2000.

[4] Weinberg, P.J., Nature, Vol.233, 239-241, 1971.

[۵] عباسی خزائی، ک.، حمیدی، ع.ع.، رحیمی، م. "کوره های صنعتی عمل کننده با هوای احتراق بسیار داغ و رقیق"، دومین



شکل (۳): نمای طرحواره، و ساختار شبکه و دامنه محاسباتی کوره



شکل (۴): توزیع دمای کوره، تحت غلظت ۲۱٪ اکسیژن و جریان

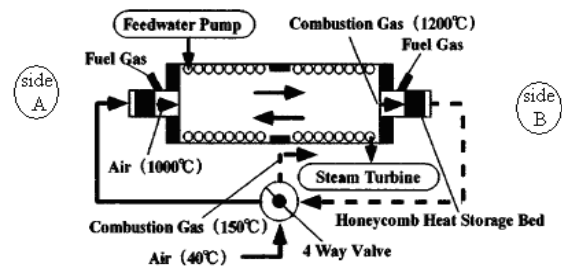
جرمی ۰/۱۷۴۵ کیلوگرم بر ثانیه سوخت معمولی، الف) دمای معمولی ب) دمای بالای هوای احتراق

[12] Kobayashi, H and Yoshikawa, K., "Thermal Performance and Numerical Simulation of High Temperature Air Combustion Boiler", Proceeding of International Joint Power Generation Conference (IJPGC2000-15083), 2000.

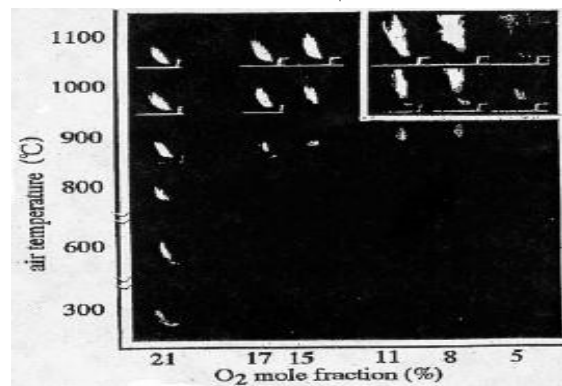
[13] Nogay, R., "Better Design Method for Fired Heaters", Hyd.Proc, pp.91-95, 1985.

[۱۴] عباسی خزائی، کیومرث، "مدلسازی و شبیه سازی بخش تشعشع کوره ها با استفاده از مدل‌های پیشرفته"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی (فرآیند)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۴.

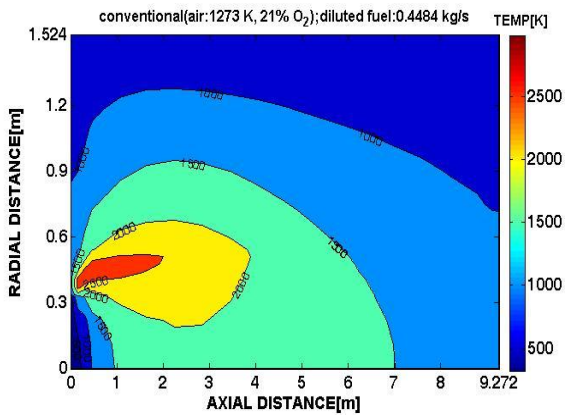
[۱۵] عباسی خزائی، کیومرث، "مدلسازی و شبیه سازی عددی کوره های صنعتی عمل کننده با هوای احتراق بسیار داغ و رقیق در راستای تحقق الزامات جهانی انرژی- زیست محیطی"، پایان‌نامه دکتری مهندسی انرژی، دانشکده انرژی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، ۱۳۸۸.



شکل (۱): مفهوم عملکرد یک کوره HPDAC



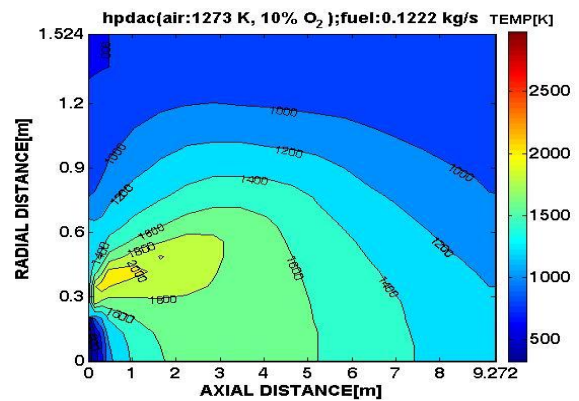
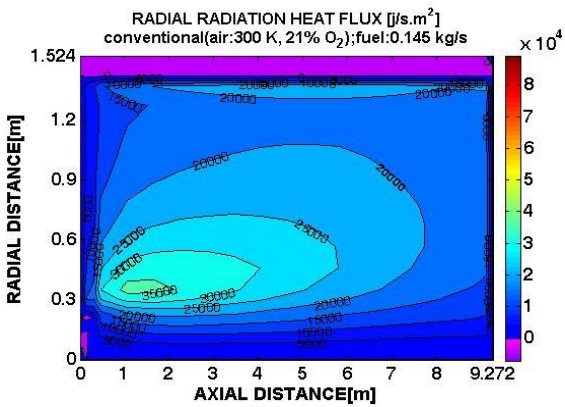
شکل (۲): تصویر شعله تحت شرایط مختلف دما و غلظت هوای احتراق



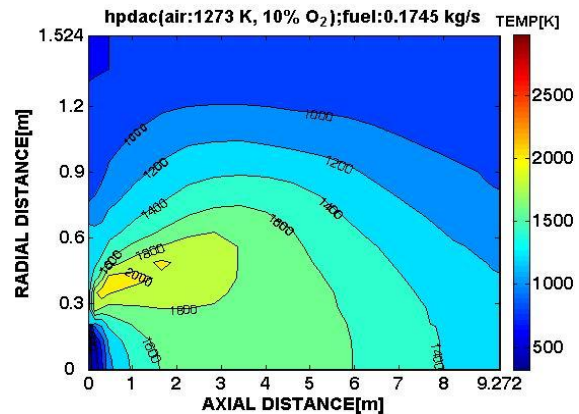
ب) ۲۱٪ غلظت اکسیژن

شکل ۶- توزیع دمای کوره، تحت دمای بسیار بالای هوای احتراق و جریان جرمی 0.4484 kg/s (الف) ۱۰٪ غلظت اکسیژن و

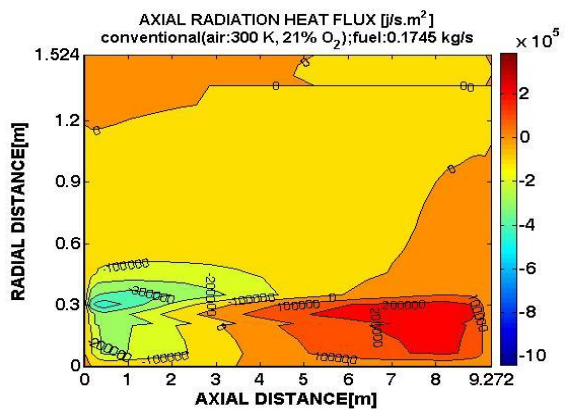
ب) ۲۱٪ غلظت اکسیژن

الف) جریان جرمی 0.1222 kg/s 

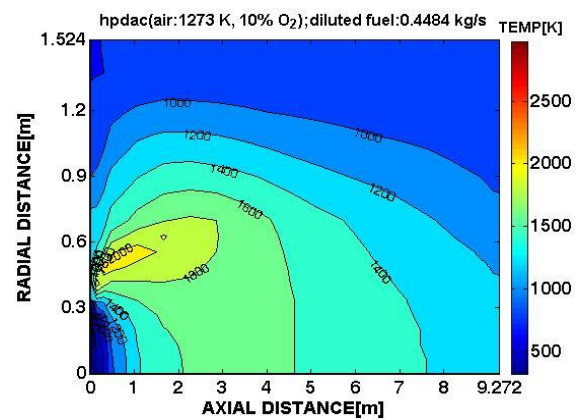
الف) توزیع شعاعی

الف) جریان جرمی 0.1745 kg/s

شکل (۵): توزیع دمای کوره، تحت غلظت ۱۰٪ اکسیژن، و دمای بسیار بالای هوای احتراق (الف) جریان جرمی 0.1222 kg/s (ب)

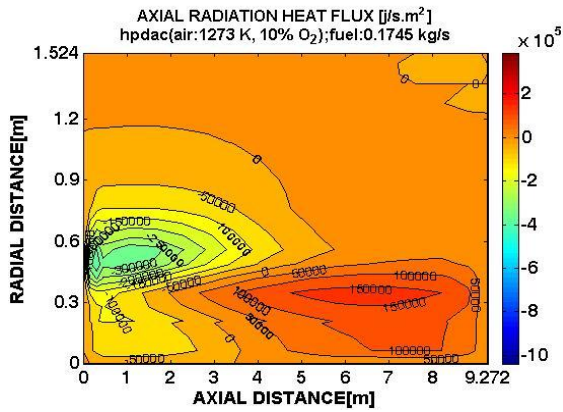
جریان جرمی 0.1745 kg/s 

ب) توزیع محوری

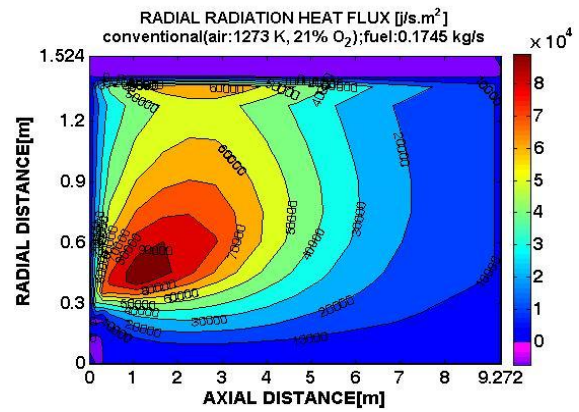


الف) ۱۰٪ غلظت اکسیژن

شکل (۷): توزیع محوری و شعاعی شدت حرارت تشعشعی، تحت غلظت ۲۱٪ اکسیژن، دمای معمولی هوای احتراق و جریان جرمی سوخت 0.1745 kg/s (الف) توزیع شعاعی و (ب) توزیع محوری

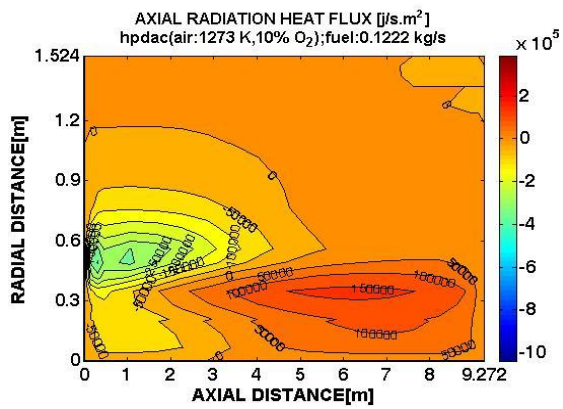


(ب) توزیع محوری

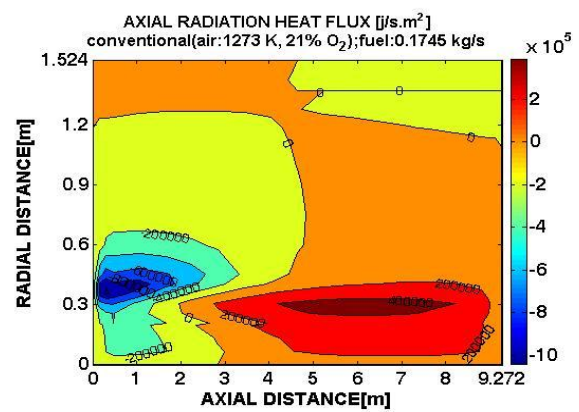


(الف) توزیع شعاعی

شکل (۹): توزیع محوری و شعاعی شدت حرارت تشعشی، تحت غلظت ۱۰٪ اکسیژن، دمای بسیار بالای هوای احتراق و جریان جرمی سوخت ۰/۱۷۴۵ kg/s (الف) توزیع شعاعی و (ب) توزیع محوری

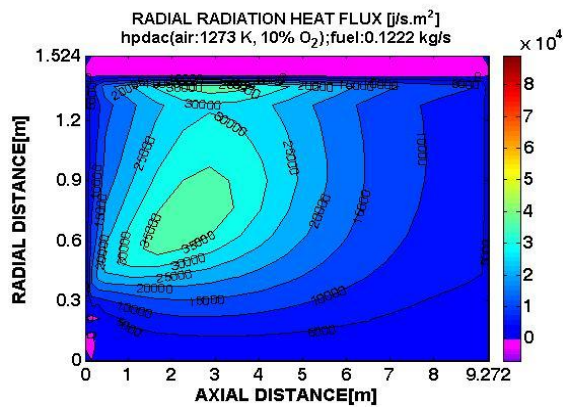


(الف) توزیع محوری

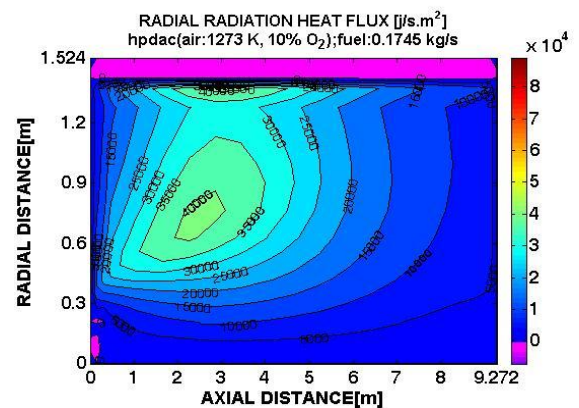


(ب) توزیع محوری

شکل (۸): توزیع محوری و شعاعی شدت حرارت تشعشی، تحت غلظت ۲۱٪ اکسیژن، دمای بسیار بالای هوای احتراق و جریان جرمی سوخت ۰/۱۷۴۵ kg/s (الف) توزیع شعاعی و (ب) توزیع محوری

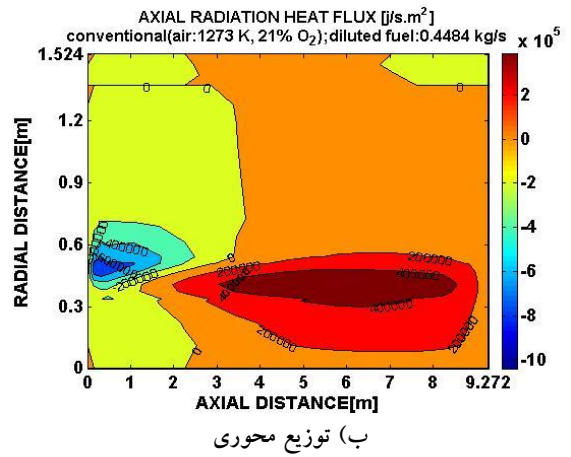
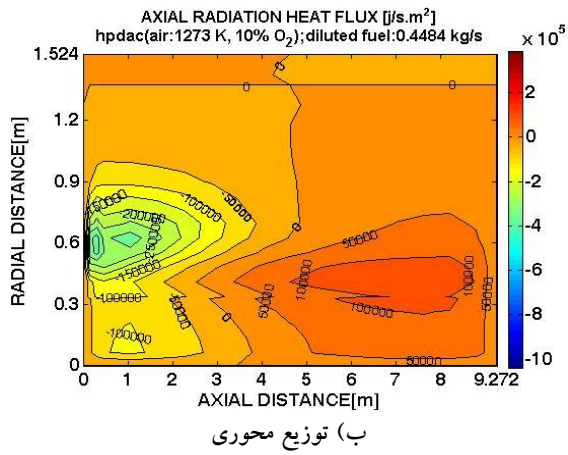
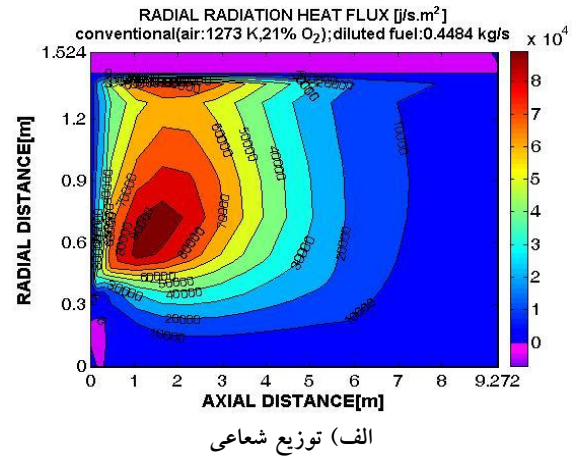
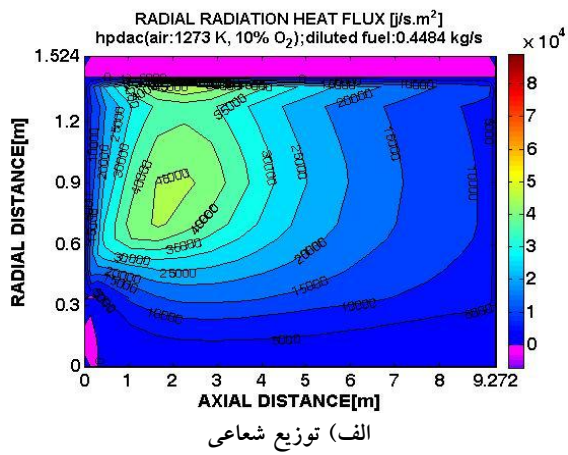


(ب) توزیع شعاعی



(الف) توزیع شعاعی

شکل ۱۰- توزیع محوری و شعاعی شدت حرارت تشعشی، تحت غلظت ۱۰٪ اکسیژن، دمای بسیار بالای هوای احتراق و جریان جرمی سوخت ۰/۱۲۲۲ kg/s



شکل ۱۲- توزیع محوری و شعاعی شدت حرارت تشعشی، تحت غلظت ۱۰٪ اکسیژن، دمای بسیار بالای هوای احتراق و جریان جرمی سوخت 0.4484 kg/s

شکل (۱۱): توزیع محوری و شعاعی شدت حرارت تشعشی، تحت غلظت ۲۱٪ اکسیژن، دمای بسیار بالای هوای احتراق و جریان جرمی سوخت 0.4484 kg/s

جدول (۱) شرایط احتراق و نتایج مطالعات موردی شبیه سازی شده

| | Zone model [13] | previous works[5-10] | | | | Present work | |
|--|----------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | | case 1 | case 2 | case 3 | case 4 | case 5 | case 6 |
| fuel type, % v | natural gas | natural gas | natural gas | natural gas | natural gas | 50%N ₂ + 50%natural gas | 50%N ₂ + 50%natural gas |
| air/fuel stoichiometric ratio, kg/kg | 16.5 | 16.5 | 16.5 | 35.5 | 35.5 | 6.004 | 12.384 |
| air temp after regenerator , K | 300 | 300 | 1273.15 | 1273.15 | 1273.15 | 1273.15 | 1273.15 |
| air temp before regenerator , K | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| fuel temp, K | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| oxygen concentration of air, % v | 21 | 21 | 21 | 10 | 10 | 21 | 10 |
| excess air, % v | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| fuel flow rate , kg.s ⁻¹ | 0.1745 | 0.1745 | 0.1745 | 0.1745 | 0.1222 | 0.4484 | 0.4484 |
| fuel velocity, m.s ⁻¹ | - | 1.91 | 1.91 | 1.91 | 1.34 | 1.407 | 1.407 |
| air velocity , m.s ⁻¹ | - | 10.91 | 22.51 | 22.75 | 15.93 | 18.81 | 18.91 |
| outlet flue gas velocity , m.s ⁻¹ | - | 5.58 | 4.69 | 9.27 | 6.29 | 4.171 | 8.677 |
| residence time of furnace flow , s | - | 4.763 | 5.667 | 2.868 | 4.226 | 6.374 | 3.064 |
| momentum flux ratio ^a | - | 0.13745 | 0.13726 | 0.13725 | 0.13725 | 0.13727 | 0.13724 |
| fired heat , MW | 8.939 | 8.939 | 8.939 | 8.939 | 6.258 | 8.939 | 8.939 |
| process fluid inlet temp, K | 783.15 | 783.15 | 783.15 | 783.15 | 783.15 | 783.15 | 783.15 |
| process fluid outlet temp, K | 801.6 | 798.37 | 813.97 | 802.14 | 800.55 | 812.03 | 804.38 |
| furnace efficiency ,% | 39.01 | 38.653 | 78.254 | 48.236 | 63.114 | 73.36 | 53.903 |
| required regenerator efficiency ,% | 0.0 | 0.0 | 92.99 | 104.2 | 109 | 104.4 | 99.1 |
| flue gas temp before regenerator , K | 1485.93 ^b | 1437.48 | 1198.86 | 1125.3 | 1088.9 | 1033.65 | 1128.9 |
| flue gas temp after regenerator , K | 1485.93 | 1437.48 | 362.8 | 265.2 | 228.8 | 267.6 | 307.3 |
| Max & mean gas temp of combustion chamber, K | 1817 1338 | 2347 1410 | 3201 1552 | 2132 1352 | 2128 1323 | 2912 1484 | 2124 1334 |
| R_{GTU} ,% ^c | - | 31.36 | 32.92 | 24.366 | 24.192 | 33.763 | 23.796 |

a: fuel to air momentum flux ratio[15].

b: actual (operating) value of bridge wall temperature = 1427.59 K[13].

c: gas temperature uniformity ratio(R_{GTU}), the lower R_{GTU} results in the higher uniformity[15].