



مطالعه اثر پیش گرمایش سوخت گاز طبیعی بر تشکیل دوده، درخشندگی شعله و انتشار NO به روش عددی و آزمایشگاهی

محمد جلیلی مهر^۱، محمد مقیمان^{۲*} و حمید نیازمند^۲

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، پردیس بین الملل، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۲/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۱۶

چکیده

در این مقاله، به مطالعه اثر افزایش دمای گاز طبیعی ورودی به یک مشعل ۱۲۰kW، بر تشکیل دوده و افزایش تابش درخشانی ناشی از آن به روش عددی و آزمایشگاهی پرداخته شده است. جهت شبیه سازی اثر دمای گاز ورودی بر احتراق و مدلسازی تشکیل کربن جامد از تجزیه حرارتی گاز، از مدل احتراق آشفته غیر پیش آمیخته بر اساس دو پارامتر متوسط و واریانس کسر مخلوط و برای مدلسازی ترمهای تنشهای توربولانی در معادلات مومنتوم از مدل آشفته تنش رینولدز استفاده شده است. همچنین جهت محاسبه دوده، که نقش مهمی بر میزان تابش شعله دارد از مدل ماس-بروکس و برای اعمال اثر آشفته جریانی بر تشکیل دوده از β -PDF استفاده شده است. مطالعات آزمایشگاهی نیز بر روی یک بویلر که گاز ورودی به مشعل آن با المنت حرارتی کروم-نیکل پیش گرم می‌شود، انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد با توجه به عدم افزایش محتوی دوده شعله با افزایش دمای سوخت ورودی تا دمای ۵۱۰K، درخشندگی شعله تغییر چندانی نکرده است، اما با افزایش دما تا ۷۰۰K به دلیل ۳ برابر شدن بیشینه کسر جرمی دوده در شعله، درخشندگی شعله افزایش زیادی می‌یابد. این افزایش درخشندگی، سبب کاهش دمای شعله به اندازه ۱۵۰K، و کاهش انتشار NO شده است. نتایج عددی و آزمایشگاهی در پیشگرم کردن سوخت توافق مطلوبی را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: حل عددی؛ دمای سوخت؛ دوده؛ تابش؛ اکسید نیتروژن.

Numerical and Experimental Study of Natural Gas Preheating Effects on the Soot Formation, Flame Luminosity and NO Emission

M. Jalilimehr¹, M. Moghiman^{2,*}, H. Niazmand

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

In this paper, the effect of inlet gas temperature on the soot content, flame temperature and overall efficiency of a 120 kW boiler have been investigated. For modeling the impact of inlet gas temperature on combustion and soot production, a non-premixed turbulent model was employed. Besides, using the Reynolds turbulent stress model, stress terms in momentum equations were solved. Also, Moss-Brooks model and a beta probability density function (β -PDF) is used to describe the effect of turbulencies on soot formation. Moreover, experiments were conducted on a boiler which its inlet gas temperature is preheated with a Chrome-Nickel electric heater. The results demonstrate that the preheating of natural gas up to about 510 K has no considerable effect on the flame luminosity. Otherwise, preheating the inlet fuel up to 700 K increases the flame soot content up to 3 times resulting in a serious luminosity rise. This increase causes a reduction in flame temperature (150K) and NO emission. It is seen that the predicted results have good agreement with measurements.

Keywords: Numerical Solution; Fuel Temperature; Soot; Luminosity; NO.

۱- مقدمه

در کوره های صنعتی با شعله دیفیوژن، بدلیل برخورد سوخت ورودی با گازهای داغ در ابتدای شعله و شکستن زنجیره سوخت و تشکیل گونه هایی مانند C_2 ، CH_3 و CH_2 میزان درخشندگی شعله بویژه در ابتدای آن بسیار بالاست [۱]. در این شعله ها که اغلب در کوره های صنعتی با ظرفیت بالا مورد استفاده قرار می گیرند، تابشهای حرارتی و درخشانی شعله ها نقش مهمی در انتقال حرارت داخل محفظه احتراق دارند [۲]. تابش درخشانی شعله ارتباط زیادی به مقدار کربنهای موجود در مولکول سوخت دارد، بطوریکه در سوخته های سبک مانند گاز طبیعی تابش درخشانی و در نتیجه انتقال حرارت تابشی پایین می باشد [۳]. لذا جایگزینی سوخت گاز طبیعی به جای سوخت مایع در کوره های صنعتی، به علت پایین بودن تعداد اتمهای کربن نسبت به هیدروژن در سوخت گاز طبیعی، تابش درخشانی و در نتیجه انتقال حرارت تابشی را شدیداً کاهش داده که این موجب افزایش دمای گازهای دودکش و در نتیجه اتلاف انرژی می شود [۳]. بر اساس مطالعات ویسکانتا^۱ و همکارانش [۱] گازهای داغ CO_2 و H_2O نقش مهمی در تابش حرارتی و ذرات دوده اهمیت زیادی بر تابش درخشانی و انتقال حرارت ناشی از آن دارد. از آنجا که در شعله های گاز طبیعی به علت پایین بودن تعداد ذرات دوده، درخشندگی شعله قابل توجه نمی باشد، بسیاری از محققین روشهای مختلف افزایش دوده در شعله سوخت گازی و افزایش درخشانی آن را مورد مطالعه قرار دادند. از جمله روشهای مورد استفاده می توان به روش تزریق سوخت مایع و جامد [۳] و ایجاد میدان الکتریکی با فرکانسهای مختلف [۴] اشاره نمود. همچنین مطالعات محققین در زمینه اثرات پیشگرمایش هوا بر ساختار شعله نشان می دهد که افزایش دمای هوای ورودی موجب افزایش دمای شعله و در نتیجه افزایش تجزیه حرارتی سوخت ورودی به کوره و برخورد کننده به آن می گردد [۶ و ۵]. مندل^۲ و همکارانش [۵] که اثر پیشگرمایش هوا را بر میزان تشکیل دوده و انتشار NO در شعله پخشی آرام سوخت متان مورد بررسی قرار دادند، مشاهده نمودند با افزایش دمای هوا از

۳۰۰K تا ۴۰۰ K میزان دوده تشکیل شده در شعله تا ۳/۵ برابر افزایش می یابد. همچنین لیم^۳ و همکارانش [۶] با پیشگرم کردن هوای ورودی به محفظه احتراق متان-هوا از ۳۰۰K تا ۵۶۰K، مشاهده نمودند غلظت اتمهای هیدروژن داخل محفظه احتراق افزایش چشمگیری یافته که علت آن را افزایش نرخ واکنشهای تجزیه سوخت و جداسازی هیدروژن از متان بیان نمودند. چنانچه هوای ورودی به محفظه احتراق تا دماهای بیش از ۱۲۷۳ K پیشگرم شود، این سیستم بعنوان احتراق با هوای دما بالا^۴ شناخته می شود [۷] که هدف آن از پیشگرمایش دمای بالای هوا، افزایش پایداری شعله و امکان کاهش غلظت اکسیژن ورودی تا حدود ۵٪ می باشد. کیم^۵ و همکارانش [۷] با اندازه گیری گونه های CH ، C_2 و OH به مطالعه آزمایشگاهی اثر دمای هوای ورودی (از ۳۰۰K تا ۱۲۷۳ K) و غلظت اکسیژن موجود در آن (از ۵٪ تا ۲۱٪) بر ساختار شعله در سیستم احتراق با هوای داغ پرداختند. عکس برداریهای آنها از شعله این سیستم نشان داد که در اثر افزایش دمای هوای ورودی غلظت گونه های C_2 و CH بدلیل افزایش نرخ واکنش های تجزیه حرارتی سوخت هیدروکربنی در شعله افزایش می یابند [۷]. یکی از روشهای افزایش نرخ تجزیه حرارتی سوخت، پیشگرمایش آن می باشد [۹ و ۸]. یانگ و همکارانش [۹] همراه با پیشگرمایش هوا، به مطالعه اثرات پیشگرمایش سوخت ورودی (گاز پروپان) بر دمای ماکزیمم شعله و انتشار آلاینده NO برای مقادیر مختلف اکسیژن ورودی پرداختند. نتایج آنها نشان داد با افزایش دمای سوخت ورودی، دمای بیشینه شعله و انتشار آلاینده NO حرارتی کاهش می یابد. کاهش دمای بیشینه شعله می تواند به دلیل افزایش درخشندگی شعله در اثر تشکیل ذرات کربنی و افزایش انتقال حرارت تابشی صورت گرفته باشد. پور حسینی و مقیمان [۱۰] برای افزایش تابش درخشندگی شعله اثر تزریق زغال سنگ بر ساختار شعله دیفیوژن گاز طبیعی مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. همچنین آنها اثر همسوزی همزمان گاز-گازوئیل را بر شدت درخشندگی و تابش شعله اندازه گیری نمودند [۱۱].

³ Lim⁴ High Temperature Air Combustion⁵ Kim¹ Viskanta² Mandal

شده و بیشتر آنها به CO تبدیل می شوند. نتایج محققین نشان می دهد حتی وجود مقادیر بسیار کمی از کربن جامد (در حد ۱۰ ppm) در شعله سبب افزایش شدید تابش درخشانی شعله و کاهش انتشار آلاینده NO می گردد [۱۴ و ۱۵]. حضور ذرات کربن در شعله موجب افزایش ضریب انتشار و افزایش تابش شعله می گردد. در مدل‌های توسعه یافته برای محاسبه اثر کربن جامد بر تابش شعله، ضریب جذب اصلاح شده ای برای مخلوط گازهای احتراقی حاوی کربن (a_m) بصورت زیر تعریف می شود [۱۶]:

$$a_m = a_{gas} + a_{soot} \quad (2)$$

در این رابطه a_{gas} ضریب جذب مخلوط گازهای احتراقی بدون اثر کربن جامد بوده که از مدل مجموع وزن دهی شده گازهای خاکستری WSGGM^۱ [۱۶] قابل محاسبه است. همچنین a_{soot} ، ضریب جذب ذرات کربن بوده که بر حسب دما و کسر جرمی ذرات آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$a_{soot} = b_1 \rho m_s [1 + b_T (T - 2000)] \quad (3)$$

که در آن b_1 و b_T ثوابت تجربی، ρ چگالی مخلوط گازی و m_s کسر جرمی دوده می باشد [۱۶]. این افزایش ضریب جذب و نشر شعله، با توجه به وابستگی شدید NO_x حرارتی به دمای بیشینه شعله، کاهش دمای شعله سبب کاهش شدید انتشار NO_x می گردد.

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

برای مدل‌سازی اثر پیش‌گرمایش گاز طبیعی بر ساختار شعله، معادلات حاکم بر پدیده احتراق آشفته داخل محفظه احتراق بویلر مورد مطالعه شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی، تابش و گونه‌های شیمیایی با استفاده از نرم افزار عددی فلونتت به روش حجم‌های محدود و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شده‌اند. با توجه به آشفته بودن جریان از معادلات متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز استفاده شده است. این معادلات در حالت پایا عبارتند از معادله بقای جرم:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (4)$$

که در آن ρ چگالی سیال و \bar{v} بردار سرعت متوسط‌گیری شده زمانی است و معادله بقای مومنتوم:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) =$$

^۱ weighted-Sum-of-Gray-Gases Model (WSGGM)

جوادی و مقیمان [۱۲] به مطالعه آزمایشگاهی اثر افزایش دمای سوخت بر درخشندگی شعله و انتشار آلاینده NO_x در یک بویلر صنعتی پرداختند. نتایج اندازه‌گیری آنها، که بطور محدود در خروجی دودکش انجام شده، نشان می‌دهد که افزایش دمای گاز ورودی می‌تواند اثر چشمگیری بر کاهش دمای گازهای خروجی از دودکش بدلیل افزایش درخشندگی شعله و تابش آن داشته باشد. آنها مطالعه‌ای روی تغییر محتوی دوده شعله با افزایش دمای سوخت گاز ورودی انجام ندادند.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مطالعه اثر پیش‌گرمایش هوا تا دماهای بسیار بالا^۲ توسط محققین مختلف انجام شده، ولی "پیش‌گرمایش سوخت تا دماهای بالا و تاثیر آن بر تغییر ساختار شعله و تشکیل دوده در آن" تاکنون انجام نشده و به ندرت و فقط برای دماهای پایین سوخت ورودی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به تغییر ساختار شعله و گونه‌های شیمیایی تولید شده در احتراق با گاز داغ و اهمیت نقش آنها بر تشکیل دوده و تابش درخشانی ناشی از آن، در این مقاله به مطالعه فرآیند تشکیل و احتراق دوده در شعله سوخت گاز طبیعی پیش‌گرم شده تا دمای ۷۰۰K و اثر آن بر تابش درخشانی پرداخته شده است. همچنین با توجه به پیچیده شدن فرآیند تشکیل دوده در دماهای بالای سوخت ورودی، بدلیل افزایش نرخ تجزیه گاز و تشکیل هیدروکربنهای حلقوی، در این مقاله از مدل ماس-بروکس استفاده شده است. همچنین اثرات آشفستگی بر نرخ تشکیل دوده با استفاده از مدل PDF با توزیع β در محاسبات اعمال شده است.

۲- تجزیه حرارتی گاز طبیعی و اثر آن بر تابش شعله

ترکیب اصلی گاز طبیعی در ایران بیش از ۹۶/۵٪ متان می باشد لذا خواص آن به خواص متان بسیار نزدیک می‌باشد. دو محصول اصلی تجزیه حرارتی متان، کربن جامد و گاز هیدروژن می باشد [۱۳]:



سرعت واکنش فوق و تشکیل ذرات کربن حاصل از آن بستگی زیادی به دمای واکنش داشته و با افزایش دما، افزایش می یابد. در داخل کوره ذرات کربن تولید شده اکسید

آشفتگی بر نرخ تشکیل آلاینده ها با استفاده از مدل PDF با توزیع β وارد محاسبات شده است. از آنجا که در این مقاله اثر تابش شعله نقش مهمی بر نتایج دارد، برای محاسبه تابش از مدل DO استفاده شده است. همچنین برای اعمال اثرات تابشی مخلوط گاز، ضریب جذب گاز از مدل WSGGM و برای اعمال اثر تابشی دوده از معادله (۳) استفاده شده است.

برای جلوگیری از واگرایی ضرایب زیر تخفیف در حل معادله مومنتوم 0.07 ، معادلات توربولنسی 0.08 ، فشار 0.03 ، تابش، انرژی و دما 1 (در ابتدای حل 0.05) و کسر مخلوط و واریانس آن به ترتیب 1 و 0.09 می باشد.

بر اساس تستهای انجام شده، دبی جرمی گاز طبیعی $5/6$ kg/s و دبی هوای ورودی 1.09 kg/s ($1.13/9$ ٪ هوای اضافه) می باشد. با توجه به خنک شدن بدنه بویلر با آب، دمای بدنه بویلر $335K$ ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین در دهانه خروجی گازهای داغ، از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است.

۴- اثرات آشفتگی بر نرخ واکنش های شیمیایی

در پژوهش حاضر برای مدل سازی احتراق از مفهوم کسر مخلوط و برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی بر نرخ واکنش-های شیمیایی از مدل تابع چگالی احتمال با توزیع فرضی استفاده شده است [۶]. تابع چگالی احتمال که با $p(f)$ نشان داده می شود، توصیف کننده نوسانات لحظه ای کمیت f در جریان آشفته می باشد و می تواند بعنوان کسری از زمان که سیال خاصیت f را دارد، در نظر گرفته شود. شکل تابع $p(f)$ به طبیعت اغتشاشات متغیر f در جریان آشفته وابسته است. در جریان های واقعی توزیع $p(f)$ دقیقاً مشخص نمی باشد، به همین دلیل در روش تابع چگالی احتمال با توزیع فرضی، بر اساس مشاهدات تجربی یک تابع ریاضی برای $p(f)$ در نظر گرفته می شود که تقریبی از شکل واقعی آن می باشد. اگر ϕ_i نشان دهنده کسر جرمی گونه i ام و یا هر خاصیت ترمودینامیکی جریان سیال باشد، با مشخص بودن توزیع $p(f)$ ، مقادیر متوسط گیری شده زمانی آن با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 p(f) \phi_i(f) df \quad (10)$$

$$-\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\mu(\nabla \bar{v}) + (\nabla \bar{v})^T) - \rho \overline{v'v'} \quad (5)$$

که در آن v' نوسانات آشفته بردار سرعت، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال و p فشار است. خطوط افقی روی متغیرها نشان دهنده مقادیر متوسط گیری شده است. جملات تنش-های رینولدز $\rho \overline{v'v'}$ بایستی مدلسازی شوند تا معادلات فوق بسته شوند. در این پژوهش برای مدلسازی این جملات از مدل تنش رینولدز [۸]، استفاده شده است.

معادله انرژی در فرم کلی بصورت زیر می باشد [۱۷]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\bar{v}_{eff} \cdot \bar{v})) + S_h \quad (6)$$

که در مدلسازی احتراق غیر آدیاباتیک در فرم آنتالپی کلی با فرض عدد لوییس یک ($Le=1$) بصورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{H}) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{C_p} \nabla \bar{H} \right) + S_h \quad (7)$$

که در آن K_t ضریب هدایت آشفته، C_p ظرفیت گرمایی در فشار ثابت سیال و S_h حرارت ناشی از انجام واکنش های شیمیایی هر گونه ترم تولید حرارت حجمی است. همچنین در صورت بزرگ بودن ترم های هدایت سیال و پخش گونه ها نسبت به ترم اول سمت راست معادله (۷)، در عبارت چشمه در نظر گرفته می شوند [۱۷]. همچنین آنتالپی کلی عبارتست از:

$$H = \sum_j Y_j H_j \quad (8)$$

که در آن Y_j کسر جرمی گونه j ام می باشد و داریم:

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T C_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \quad (9)$$

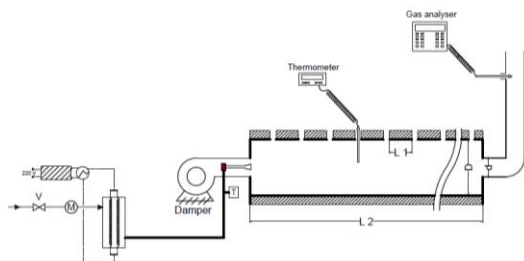
که $h_j^0(T_{ref,j})$ آنتالپی تشکیل گونه j ام در دمای مرجع می باشد.

برای محاسبه دوده پس از بررسی مدل های مختلف (خان-گریوز، تسنر و ماس-بروکس)، از مدل ماس-بروکس که اثر غلظت گونه های میانی (بخصوص استیلن، بنزن، رادیکال فنیل و آروماتیک های حلقوی) بر نرخ هسته زایی، انعقاد و رشد سطحی در مراحل تشکیل دوده در نظر می گیرد [۱۸] و همچنین برای محاسبه NO_x از مکانیزم های حرارتی و فوری بصورت پس پردازش استفاده شده است. همچنین اثر

توسط نرم افزار فلونتت از بین ۵۵۳ گونه شیمیایی مختلف است که بیشترین احتمال تولید را می دهند. می باشند.

۵- بستر آزمایش و روش تست

مطالعات آزمایشگاهی بر روی یک بویلر ۱۲۰kW با سوخت گاز طبیعی (که با توجه به اینکه ترکیب اصلی آن متان می باشد، در شبیه سازی ها گاز ورودی متان در نظر گرفته شده است) انجام شده است. محفظه احتراق بویلر دارای قطر ۴۰۰mm و طول ۱۵۰۰mm می باشد. در شکل ۱ بستر آزمایش شامل مشعل، ساختمان داخلی بویلر، سیستم گرمایش گاز و تجهیزات اندازه گیری نشان داده شده است. ساختمان بویلر بر اساس استاندارد DIN EN676 طراحی و ساخته شده است [۱۹]. مشعل مورد استفاده از نوع مشعلهای گازسوز دمنده دار خودکار بوده که ظرفیت حرارتی آن بین ۶۰ تا ۱۲۰ کیلووات بر حسب دبی سوخت و هوای ورودی قابل تنظیم می باشد. سوخت ورودی از یک لوله افقی به قطر ۱۰mm متر و هوای ورودی از یک ناحیه حلقوی بین لوله سوخت و لوله هم مرکز با آن با قطر داخلی ۱۰۰mm وارد محفظه احتراق می شود. جهت اختلاط سوخت و هوا، در دهانه خروجی مشعل از یک شعله پخش کن با زاویه چرخش ۴۵ درجه استفاده شده است. با توجه به نحوه ورود سوخت و هوا، نوع شعله از نوع شعله های غیر پیش آمیخته آشفته می باشد.



شکل ۱- سیستم گرمایش گاز ورودی (بالا) شماتیک بستر تست بویلر (پایین)

در این مدل سازی توزیع در نظر گرفته شده برای تابع $p(f)$ توزیع β می باشد که عبارتست از:

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}df} \quad (11)$$

که مقادیر α و β بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{f'^2} - 1 \right] \quad (12)$$

$$\beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{f'^2} - 1 \right] \quad (13)$$

در تابع فوق، دو متغیر f و \bar{f} به ترتیب کسر مخلوط و واریانس کسر مخلوط بوده و از دو معادله بقاء به شکل زیر محاسبه می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f'^2) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} f'^2) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla f'^2 \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} \bar{f}'^2 \quad (15)$$

مقادیر f' اختلاف مقادیر لحظه ای و متوسط کسر مخلوط ($f' = f - \bar{f}$) بوده و S_m ترم چشمه برای مسائل مختلف مانند تبخیر قطرات سوخت می باشد. در پژوهش حاضر، اثرات آشفتنگی بر نرخ واکنش های شیمیایی با استفاده از مدل تابع چگالی احتمال^۱ با توزیع β در نظر گرفته شده اند. پس از اصلاح نرخ واکنش های شیمیایی مقادیر کسر جرمی گونه ها، چگالی و دما بر حسب مقادیر مختلف f و f'^2 در جداول مشخصی ذخیره شده و در حین حل عددی جریان آشفته احتراقی از آن استفاده می شود. این مدل محدودیتی در محاسبه تعداد گونه های شیمیایی و واکنش ها ندارد. در این مقاله تعداد گونه های شیمیایی، ۲۰ عدد در نظر گرفته شده است که مهمترین آنها $CH_4, O_2, N_2, CO, CO_2, H_2O,$ سایر ترکیبات هیدروکربنی با ۲ تا ۴ کربن می باشند که احتمال تولید آنها در محفظه احتراق می رود. تشخیص گونه های شیمیایی

¹ Probability Density Function

جدول ۱- مشخصات سنسورها

پارامترهای اندازه‌گیری شده	گستره اندازه‌گیری	دقت در محدوده مورد استفاده
دما	۰-۲۰۰°C	±۰/۴ °C
O ₂	۰-۲۵%	±۱ °C
CO	۰-۱۰۰۰ppm	±۰/۲%
NO	۰-۳۰۰۰ppm	±۱۰ ppm
درصد هوای اضافه (محاسباتی)	----	±۸ ppm
		±۰/۸

ناشی از درخشندگی آن) برای دماهای مختلف سوخت ورودی با استفاده از دستگاه پیرانومتر اندازه‌گیری و تصاویر شعله نیز در دماهای مختلف ثبت شده است. جهت اطمینان از رسیدن مجموعه بویلر به شرایط پایدار و تکرار پذیری اندازه‌گیری‌ها، در هر آزمایش مقادیر متغیرهای مختلف در فواصل ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری شده و پس از اطمینان از رسیدن بویلر و تجهیزات اندازه‌گیری به شرایط پایدار، مقادیر آنها ثبت و گزارش شده است. به منظور بررسی تکرار پذیری آزمایش و جلوگیری از هر گونه انحراف و خطای احتمالی در اندازه‌گیری‌های اولیه، اندازه‌گیری‌های دما مجدداً انجام گردید و بیشترین اختلاف مشاهده شده نسبت به مقادیر متوسط آنها حدود ۱۰٪ بوده است. شایان ذکر است در تمام آزمایش‌های انجام شده، دبی جرمی گاز ورودی ۵/۶kg/hr و درصد هوای اضافه، ۱۳/۹٪ ثابت نگه داشته شده است. با این مقدار هوای اضافه مشعل عملکرد بهینه داشته و کمترین انتشار CO را دارد.

۶- نتایج تجربی و عددی

در آزمایش‌های انجام شده، با افزایش دمای سوخت از ۳۰۰K تا ۷۰۰K تغییر درخشندگی شعله، غلظت گونه‌های مختلف و دمای محصولات احتراق داخل دودکش بررسی شده‌اند. در شکل ۲ اثر دمای گاز ورودی به کوره بر شدت تابش و نیز نتایج عکسبرداری نشان داده شده است. عکسهای ارائه شده نشان می‌دهند با افزایش دمای گاز ورودی، درخشندگی شعله افزایش چندانی نداشته اما برای دمای سوخت ۵۱۰K به بالا شدت درخشندگی شعله شدیداً افزایش می‌یابد.

جهت پیش گرم کردن گاز ورودی به مشعل از ۴ المنت الکتریکی که در داخل استوانه (شکل ۱) قرار گرفته اند، استفاده شده است. توان الکتریکی بیشینه المنتها ۴kW بوده که امکان افزایش دمای گاز تا ۸۰۰ K را میسر نموده اند. جهت اندازه‌گیری دمای گاز از یک ترموکوپل و جهت اندازه‌گیری غلظت محصولات احتراق و دما از دستگاه آنالیز گاز Testo 350XL استفاده شده است.

پروب نمونه برداری استاندارد دستگاه به طول ۷۰۰ mm و تحمل دمایی ۱۲۷۳K دارای ترموکوپل نوع K و دارای شلنگ مخصوص گاز SO₂/NO₂ می باشد. این دستگاه گونه های O₂، CO و NO را بطور مستقیم توسط سنسور اندازه‌گیری و گونه CO₂ و درصد هوای اضافه را بر حسب درصد اکسیژن اندازه‌گیری شده، محاسبه می نماید [۲۰]. در محدوده اندازه‌گیری‌های انجام شده در این مقاله، دقت سنسورهای کالیبره شده مختلف دستگاه، در جدول ۱ آورده شده است.

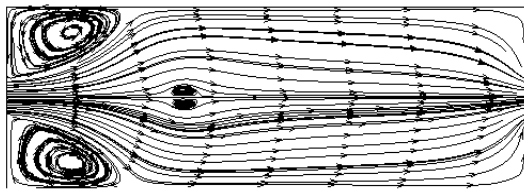
همچنین برای اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف داخل کوره ۷ دریچه استوانه‌ای روی بدنه بویلر در نظر گرفته شده است که امکان ورود پروب ترموکوپل و اندازه‌گیری دما را میسر می‌سازد.

برای اندازه‌گیری دمای محوری کوره از یک دماسنج نوع S با غلاف سرامیکی با حداکثر دمای قابل اندازه‌گیری ۲۰۰۰K و دقت ۱K استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری دمای گاز ورودی، از یک دماسنج با محدوده اندازه‌گیری دما از صفر تا ۱K و دقت ۱K استفاده شده است. جهت ارزیابی شدت درخشندگی شعله از یک دستگاه پیرانومتر با سنسور فتوولتاییک [۲۱] با قابلیت اندازه‌گیری طیف تابشی ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر که در محدوده طیف غالب تابش مرئی شعله‌های درخشنده می‌باشد [۲۲]، استفاده شده است.

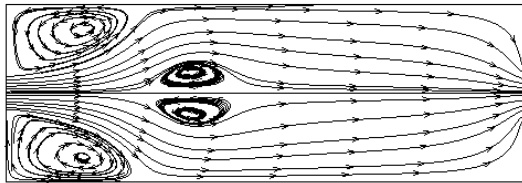
ابتدا در حالت بدون پیشگرمایش گاز ورودی، مقدار سوخت و هوای مشعل تنظیم شده و پس از رسیدن مجموعه بویلر و تجهیزات اندازه‌گیری به شرایط پایدار دمایی، مقادیر دما و غلظت محصولات احتراق داخل دودکش و دمای شعله اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از گرم‌کنهای الکتریکی و کنترل توان آنها آزمایش برای دماهای مختلف سوخت ورودی تکرار شده است. همچنین میزان تابش شعله

برای درک بهتر اثر پیش گرمایش گاز ورودی بر تغییر ساختار شعله از شبیه سازی عددی محفظه احتراق بویلر استفاده شده است. در شکل ۳ خطوط جریان داخل محفظه احتراق بویلر به ازای سه دمای سوخت ورودی ۳۰۰K، ۵۰۰K و ۷۰۰K نشان داده شده است.

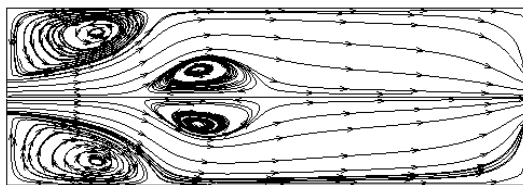
همانطور که مشاهده می شود بدلیل چرخش جریان هوای ورودی، روی محور مرکزی کوره یک ناحیه چرخش مجدد داخلی مشاهده می گردد که با افزایش دمای گاز ورودی وسعت این ناحیه افزایش یافته است. این در حالی است که افزایش دمای گاز تاثیر قابل توجهی روی نواحی چرخش مجدد گوشه محفظه احتراق ندارد.



شکل ۳-الف) $T_{fuel} = 300 \text{ K}$



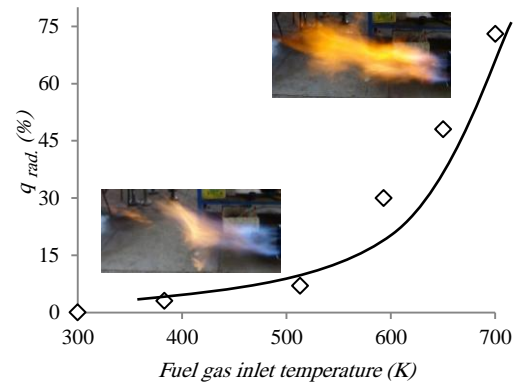
شکل ۳-ب) $T_{fuel} = 500 \text{ K}$



شکل ۳-ج) $T_{fuel} = 700 \text{ K}$

شکل ۳- مقایسه خطوط جریان محاسبه شده داخل کوره برای سه دمای گاز ورودی ۳۰۰K، ۵۰۰K و ۷۰۰K

در شکل ۴ تغییرات دمای محفظه احتراق به ازای سه دمای مختلف گاز ورودی مقایسه شده است. مشاهده می شود با افزایش دمای گاز، ناحیه با دمای بیشینه (۱۵۰۰K) کوچک شده و ناحیه با دمای ۱۴۰۰K افزایش یافته است که نشان دهنده کاهش حدود ۱۰۰ درجه ای دما می باشد.



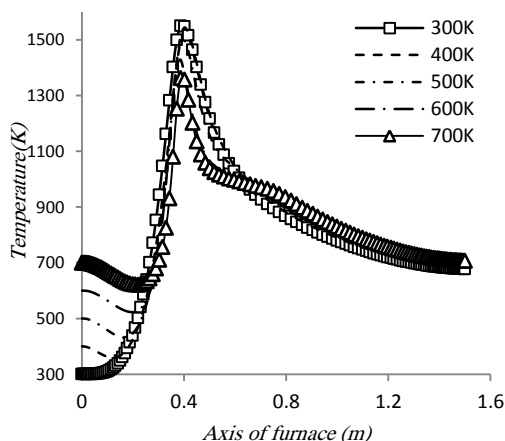
شکل ۲- اثر دمای ورودی بر تابش و درخشندگی شعله

برای بررسی میزان افزایش درخشندگی شعله با افزایش دمای سوخت و در نتیجه افزایش تابش ناشی از آن، در دبی جرمی ثابت سوخت، از پارامتر بدون بعد q_{rad} که بصورت زیر تعریف شده است، استفاده می گردد:

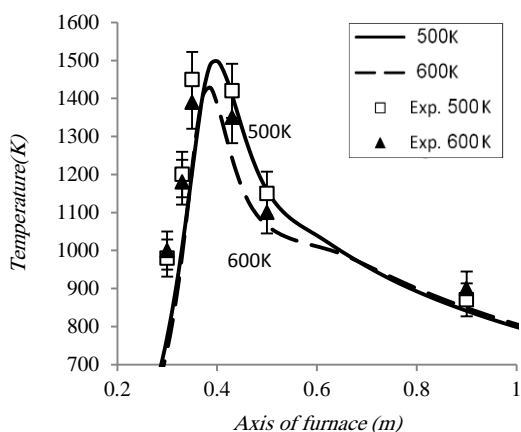
$$q_{rad} = (\dot{Q}_T - \dot{Q}_0) / \dot{Q}_0 \quad (16)$$

که در آن \dot{Q}_T و \dot{Q}_0 به ترتیب مقادیر تابش اندازه گیری شده توسط دستگاه پیرانومتر در دمای اولیه گاز ورودی (۳۰۰K) و در دمای گاز ورودی T می باشند. مقادیر بدون بعد q_{rad} اندازه گیری شده در بویلر نشان می دهد برای ایجاد درخشندگی مطلوب در گاز طبیعی به روش پیشگرمایش سوخت لازم است گاز ورودی به کوره بیش از ۵۱۰K پیشگرم گردد. در پیشگرمایش مستقیم سوخت، بخشی از حرارت مورد نیاز برای تجزیه سوخت بطور مستقیم به سوخت داده شده و بخش دیگر در اثر برخورد مولکولهای سوخت با جبهه شعله حاصل می گردد. با توجه به نقش کاتالیزوری دما در واکنش گرماگیر تجزیه حرارتی سوخت، افزایش دمای گاز ورودی سبب افزایش نرخ واکنش تجزیه حرارتی در شعله نسبت به سایر واکنشها می گردد. دمای مناسب برای تجزیه سوخت گاز طبیعی ۱۰۰۰K بوده که پیشگرمایش آن کمک زیادی به رسیدن دمای مولکولهای گاز (در اثر برخورد با شعله) به این دما می کند. نتایج ژوکوف^۱ و همکارانش [۲۳] هم نشان می دهد پیشگرم کردن گاز طبیعی تا ۴۷۳K اثر قابل توجهی بر افزایش درخشندگی شعله گاز طبیعی نداشته و دمای شعله را افزایش می دهد.

^۱ Zhukov



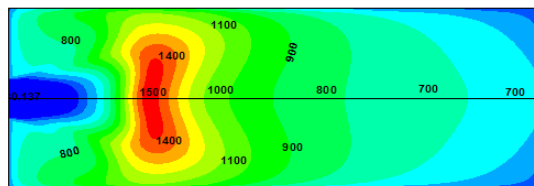
شکل ۵- توزیع محوری دمای کوره محاسبه شده به ازای دماهای مختلف گاز ورودی



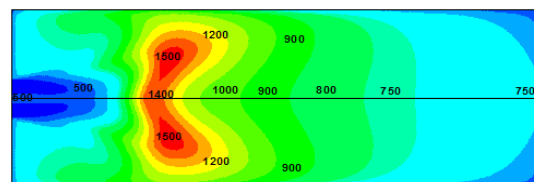
شکل ۶- مقایسه نتایج اندازه گیری و شبیه سازی توزیع محوری دمای کوره به ازای دمای گاز ورودی ۵۰۰K و ۶۰۰K

نشان می‌دهد با افزایش دمای هوای ورودی از ۳۰۰ K تا ۴۰۰ K بیشینه مقدار دوده تشکیل شده در شعله تا ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد.

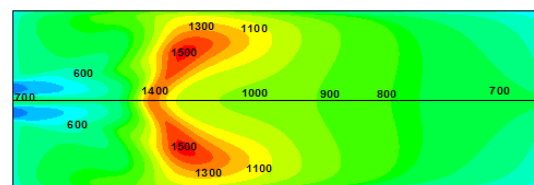
در شکل ۸ توزیع محوری دوده در محفظه احتراق برای دمای مختلف گاز ورودی مقایسه شده است. با توجه به اینکه در دماهای ۳۰۰K و ۴۰۰K میزان دوده بسیار کم می‌باشد (به ترتیب از مرتبه 10^{-9} و 10^{-6})، این دو نمودار در شکل نشان داده نشده‌اند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای گاز ورودی، دوده داخل شعله شدیداً افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش نرخ واکنش جداسازی هیدروژن و تجزیه حرارتی سوخت می‌باشد.



$T_{fuel} = 300 \text{ K}$ (الف)



$T_{fuel} = 500 \text{ K}$ (ب)

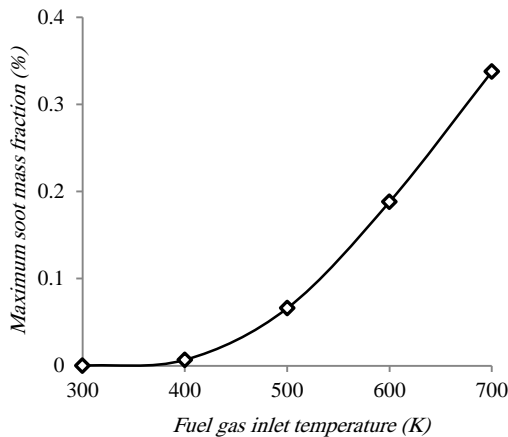


$T_{fuel} = 700 \text{ K}$ (ج)

شکل ۴ - مقایسه دمای محاسبه شده داخل کوره برای سه دمای گاز ورودی ۳۰۰K، ۵۰۰K و ۷۰۰K

در شکل ۵ اثر دمای گاز ورودی بر توزیع محوری دمای کوره نشان داده شده است. از نکات مهم در نتایج مشاهده شده، کاهش دمای بیشینه شعله روی محور کوره به ازای افزایش دمای گاز ورودی می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری برای دو دمای ورودی ۵۰۰K و ۶۰۰K نیز در شکل ۶ نشان دهنده کاهش دمای بیشینه شعله با افزایش دمای گاز ورودی می‌باشد که با نتایج عددی تطابق خوبی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود بیشترین خطای محاسبات مربوط به نقاط دما بالای شعله می‌باشند که می‌توانند به دلیل پیچیدگی رفتار جریان مغشوش و عدم اختلاط لازم و همچنین اثر نوسانات دما محاسبه نرخ تابش باشد.

در شکل ۷ توزیع کسر جرمی دوده تشکیل شده داخل محفظه احتراق به ازای سه دمای گاز ورودی ۳۰۰K، ۵۰۰K و ۷۰۰K نشان داده شده است. مشاهده می‌شود بیشینه مقدار دوده در ناحیه چرخش مجدد جریان تشکیل شده که بدلیل برخورد مولکولهای سوخت با گازهای داغ احتراقی و تجزیه سوخت می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای گاز ورودی از ۵۰۰K به ۷۰۰K بیشینه مقدار دوده تا بیش از ۵ برابر افزایش می‌یابد. نتایج مندل و همکارانش [۵] نیز

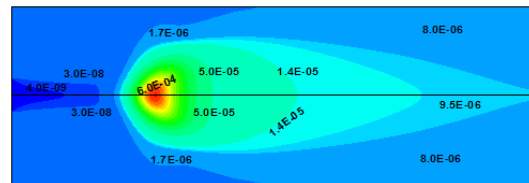


شکل ۹- تغییرات بیشینه کسر جرمی دوده (%) تشکیل شده در کوره بر حسب دمای گاز ورودی

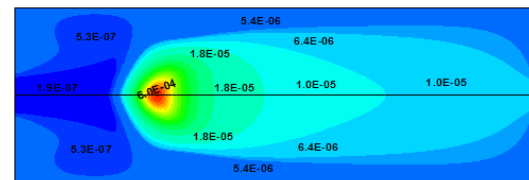
در شکل ۱۰ توزیع پیوسته غلظت آلاینده NO_x در داخل کوره برای سه دمای گاز ورودی $300K$ ، $500K$ و $700K$ مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای گاز ورودی از $300K$ به $700K$ میزان NO_x داخل محفظه احتراق بدلیل کاهش دمای بیشینه شعله و کمتر شدن زمان اقامت در نواحی دما بالای شعله (بدلیل کوچک شدن این نواحی) کاهش می‌یابد.

از مقایسه شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش حجم دوده در شعله، میزان NO_x کاهش یافته است. نتایج یانگ و بلازیاک^۱ [۹] نیز نشان‌دهنده کاهش NO_x از $180 ppm$ به $120 ppm$ در اثر پیش‌گرمایش سوخت از $473K$ به $573K$ می‌باشد. نتایج سایر محققین نیز نشان‌دهنده کاهش NO_x با اعمال اثرات دوده بر آن می‌باشد [۲۴].

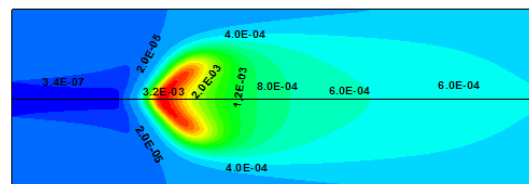
در شکل ۱۱ نتایج عددی و آزمایشگاهی میزان انتشار NO_x در دماهای مختلف سوخت ورودی نسبت به حالت بدون پیش‌گرمایش نشان داده شده است. همانطور که نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد، با افزایش دمای سوخت ابتدا انتشار آلاینده NO_x افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر دمای سوخت به نرمی روند نزولی می‌یابد. با افزایش دما تا $510K$ به دلیل افزایش دمای سوخت و عدم افزایش چشمگیر محتوی دوده شعله (شکل ۷)، دمای شعله نیز افزایش می‌یابد (شکل ۴ و ۵) ولی در دمای بالای $510K$ به دلیل افزایش نرخ



$T_{fuel} = 300 K$ (الف)

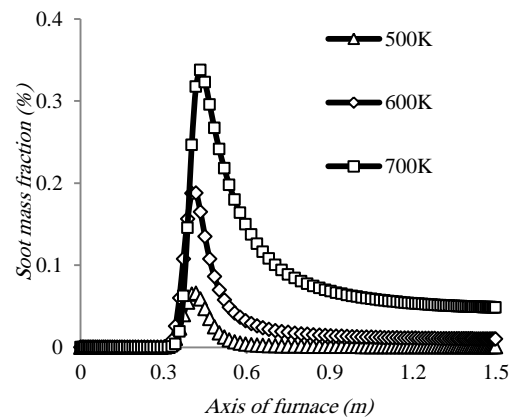


$T_{fuel} = 500 K$ (ب)



$T_{fuel} = 700 K$ (ج)

شکل ۷- مقایسه کسر جرمی دوده محاسبه شده (بدون بعد) داخل کوره برای سه دمای سوخت ورودی $700K$ ، $500K$ و $300K$



شکل ۸- توزیع محوری کسر جرمی دوده محاسبه شده برای دماهای مختلف گاز ورودی

در شکل ۹ تغییر بیشینه کسر جرمی دوده داخل کوره برای دماهای مختلف گاز ورودی بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای دماهای کمتر از $400K$ میزان دوده تشکیل شده بسیار کم می‌باشد. اما با افزایش بیشتر دما میزان دوده تشکیل شده روند صعودی می‌یابد.

^۱ Yang & Blasiak

همانطور که مشاهده می‌شود هم در نتایج عددی و هم در نتایج آزمایشگاهی، تغییر ناگهانی رفتار NO_x در دمای حدود ۵۰۰ K مشاهده شده است.

در شکل ۱۲ مقادیر محاسبه شده غلظت CO در خروجی کوره با نتایج اندازه‌گیری شده آن مقایسه شده است. هم نتایج عددی و هم آزمایشگاهی رشد شدید انتشار CO را با افزایش دمای گاز ورودی نشان می‌دهد. نتایج لیم و همکارانش [۶] نیز افزایش ۲۰٪ مقدار CO در اثر افزایش دمای هوا از ۳۰۰ K تا ۵۶۰ K را نشان می‌دهد. همانطور که نتایج نیز نشان می‌دهد مقدار CO در نتایج آزمایشگاهی بیشتر از نتایج عددی می‌باشد که می‌تواند به دلیل نقش مهم اختلاط سوخت و هوا و آشفته‌گی‌های جریان در تشکیل CO باشد. در دمای بالای ۵۱۰ K بدلیل افزایش محتوای دوده و احتراق آن مقدار CO در حل عددی بیشتر پیش بینی شده است.

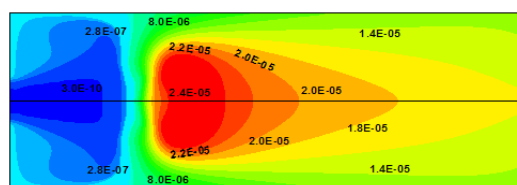
در شکل ۱۳ اثر افزایش دمای گاز ورودی بر درصد افزایش راندمان بویلر نشان داده شده است. راندمان بویلر بصورت مجموع حرارت منتقل شده به آب نسبت به کل حرارت آزاد شده از گاز و انرژی مورد نیاز برای گرم کردن گاز در نظر گرفته شده است. درصد تغییر راندمان بویلر بصورت زیر تعریف شده است:

$$\eta = \frac{\dot{\eta}_T - \dot{\eta}_0}{\dot{\eta}_0} \quad (17)$$

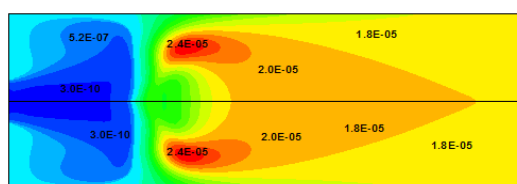
که در آن $\dot{\eta}_T$ و $\dot{\eta}_0$ به ترتیب مقادیر راندمان محاسبه شده در دمای اولیه گاز ورودی و در دمای گاز ورودی T می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای گاز تا ۵۱۰ K راندمان نیز به نرمی افزایش می‌یابد که دلیل آن احتراق بهتر گاز و تغییر کمی در رنگ شعله می‌باشد.

نتایج اندازه‌گیری شده از آنالیز محصولات احتراق داخل دودکش نشان می‌دهد با افزایش دمای گاز ورودی میزان هیدروکربنهای نسوخته از ۱۰۰ ppm به صفر می‌رسد. از طرفی با افزایش دمای گاز از ۵۱۰ K به ۷۰۰ K، راندمان بویلر ۴۰ درصد نسبت به حالت بدون پیش گرمایش افزایش می‌یابد. باید که دلیل آن افزایش سهم تابش درخشانی شعله می‌باشد. نتایج عددی نیز نشان دهنده افزایش شار تابشی به بدنه بویلر در دمای بالای ۵۱۰ K می‌باشد که دلیل آن افزایش محتوای دوده شعله و در نتیجه افزایش ضریب نشر شعله می‌باشد.

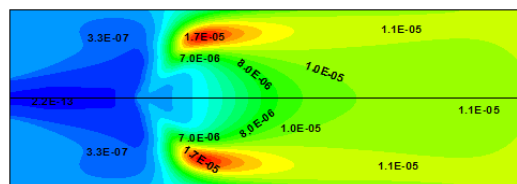
تجزیه گاز و در نتیجه افزایش محتوی دوده شعله، تابش افزایش ناگهانی یافته، دما و وسعت نواحی دما بالا کاهش یافته (زمان اقامت در نواحی بالا کاهش یافته) و در نتیجه تولید ناکس در دمای بالای ۵۱۰ K کاهش می‌یابد.



T_{fuel} = ۳۰۰ K (الف)

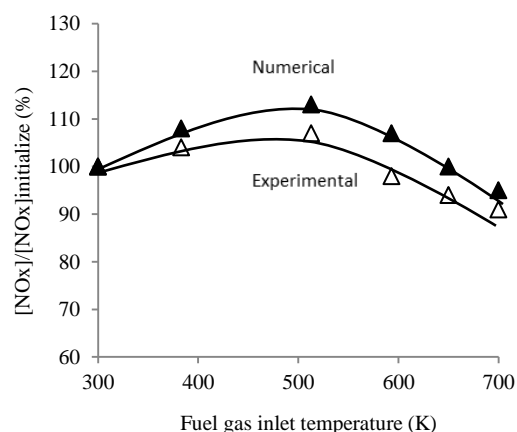


T_{fuel} = ۵۰۰ K (ب)



T_{fuel} = ۷۰۰ K (ج)

شکل ۱۰- توزیع پیوسته کسر جرمی NO_x (بدون بعد) محاسبه شده داخل کوره برای سه دمای مختلف گاز ورودی ۷۰۰ K، ۵۰۰ K، ۳۰۰ K



شکل ۱۱- مقایسه نتایج عددی و اندازه‌گیری شده انتشار آلاینده NO_x (بدون بعد) بر حسب دمای گاز ورودی

برای ایجاد درخشندگی در شعله گاز طبیعی به روش پیشگرم کردن سوخت، لازم است گاز ورودی بیش از ۵۱۰K پیشگرم گردد. نتایج عددی نشان می‌دهد با گرمایش گاز تا ۷۰۰K، محتوای دوده شعله از حدود صفر تا ۰/۳ درصد افزایش می‌یابد.

پیشگرم کردن سوخت ورودی تا دمای ۷۰۰K بدلیل افزایش سهم تابش درخشانی، سبب افزایش ۴۰ درصدی راندمان بویلر نسبت به حالت بدون پیش گرمایش سوخت می‌شود.

نتایج عددی نشان می‌دهد افزایش تابش درخشانی در اثر پیشگرم کردن سوخت ورودی، دمای بیشینه شعله را حدود ۱۵۰K کاهش داده و ناحیه بیشینه دما بسیار کوچکتر شده است. نتایج اندازه‌گیری شده نیز نشان دهنده این کاهش دمای بیشینه محور کوره به ازای افزایش دمای سوخت می‌باشد.

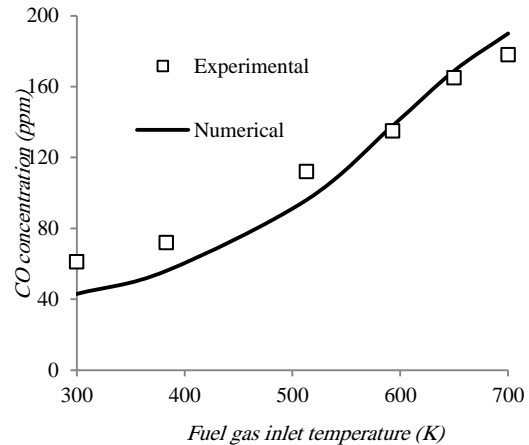
نتایج عددی نشان می‌دهد پیشگرم کردن سوخت تا دمای بیش از ۵۱۰K، بدلیل کاهش ناحیه دما بالای شعله، مقدار آلاینده NO را نیز تا ۱۰٪ کاهش می‌دهد. نتایج عددی با خطای کمتر از ۸٪ نسبت به نتایج اندازه‌گیری، پیش بینی بسیار خوبی از رفتار شعله و آلاینده NOx داشته است. با وجود پیچیدگی زیاد واکنشهای شیمیایی در فرآیند احتراق با سوخت پیش‌گرم شده، نتایج عددی بدلیل مدل‌سازی و در نظر گرفتن واکنش تجزیه سوخت، توافق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

۸- تشکر و قدردانی

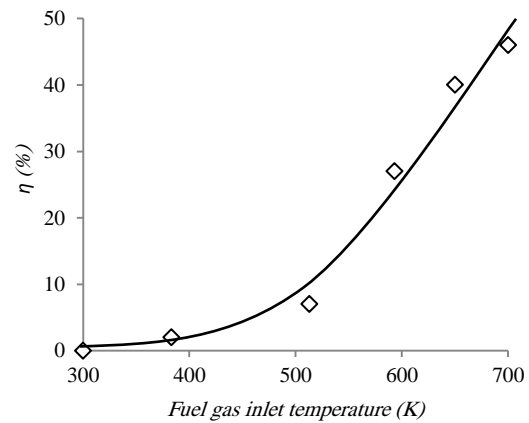
نویسنده مراتب تشکر و قدردانی خود را از واحد پژوهش و فناوری شرکت گاز استان خراسان رضوی اعلام می‌دارد.

۹- مراجع

- [1] Viskanta R, Mengu MP (1987) Radiation heat transfer in combustion systems. Prog Energ Combust 13: 97-160.
- [2] Keramidaa EP, Liakosa HH, Fountib MA, Boudouvisa AG, Markatos NC (2000) Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces. Int J Heat Mass Tran 43: 1801-1809.
- [3] Green AES, Green BAS, Wagner JC (2000) Radiation enhancement in oil/coal boilers converted to naturalgas. Available Online at <http://www.google.com/patents/US4978367>, 1990.



شکل ۱۲- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی انتشار آلاینده CO بر حسب دمای گاز ورودی



شکل ۱۳- اثر دمای گاز ورودی بر راندمان بویلر

۷- نتیجه گیری کلی

در این مقاله اثر پیشگرم کردن گاز طبیعی بر درخشندگی و دمای شعله، انتقال حرارت تابشی و در نتیجه بازده یک بویلر ۱۲۰ کیلوواتی مورد مطالعه عددی و آزمایشگاهی قرار گرفته است. نتایج محققین مختلف نشان می‌دهد عامل اصلی درخشندگی شعله، حضور و احتراق ذرات جامد دوده داخل شعله می‌باشند. با توجه به اینکه تجزیه حرارتی سوخت یکی از مکانیزمهای مهم تولید دوده در شعله بوده که با افزایش دما نرخ تجزیه آن شدیداً افزایش می‌یابد. لذا افزایش دمای گاز می‌تواند روشی مناسب برای تولید شعله‌های درخشان در احتراق گاز طبیعی باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در این مقاله می‌توان گفت:

- [14] Atreya A, Zhang C, Kim HK, Shamim T, Suh J (1996) The effect of changes in the flame structure on formation and destruction of soot and NOx in radiating diffusion flames. The Twenty-Sixth (International) Symposium on Combustion, The Combustion Institute 2181-2189.
- [15] Mungekar HP, Atreya A (2001) Flame radiation and NO emission in partially premixed flames. In Proceedings of the 2nd Joint Meeting of the US Sections of the Combustion Institute.
- [16] Taylor PB, Foster PJ (1974) Some gray weighting coefficients for CO₂-H₂O-Soot mixtures. Int J Heat Mass Tran 18(11): 1331-1332.
- [17] Ansys Inc., Ansys Fluent Theory guide, Release 15, Accessed on 28 December 2015; <http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>, 2013.
- [18] Wen Z, Yun S (2003) Modeling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames, Combustion and Flame, 135: 323-340.
- [19] BS EN 676 (2003) Automatic forced draught burners for gaseous fuels. European Standards.
- [20] Testo Inc. Short Operation Instruction Manual (testo 350 M/XL): Rev.11/03 Instrument Software Version 1.30, Accessed on 10 July 2015; <http://www.testo.com>.
- [21] Nagamine F, Shimokawa R, Miyake Y, Nakata M, Fujisawa K (1990) Calibration of Pyranometers for the photovoltaic device field. Appl Phys 29: 516-521.
- [22] Lia YH, Wub CY, Lia HY, Chao YC (2011) Concept and combustion characteristics of the high-luminescence flame for thermophotovoltaic systems. P Combust Inst 33(2): 3447-3454.
- [23] Zhukov YS, Karpushin VK, Kurochkin BN, Fomin NA, Klyucherov AP, Girisikh VF (1977) Preheating the natural gas used to heat open-hearth furnaces. Metallurgist 5: 23-24.
- [24] Guo H, Smallwood GJ (2007) The interaction between soot and NO formation in a laminar axisymmetric coflow ethylene/air diffusion flame. Combust Flame 149: 225-233.
- [4] Xie L, Kishi T, Kono M (1993) The influences of electric fields on soot formation and flame structure of diffusion flames. J Therm Sci 2: 288-293.
- [5] Mandal BK, Sarkar A, Datta A (2006) Numerical prediction of the soot and NO formation in a confined laminar diffusion flame without and with air preheat. P I Mech Eng A-J Pow 220: 473-486.
- [6] Lim J, Gore J, Viskanta R (2000) A study of the effects air preheat on the structure of methane/air counterflow diffusion flames. Combust Flame 121: 262-274.
- [7] Kim WB, Chung DH, Yang JB, Noh DS (2001) An experimental study on high temperature and low oxygen air combustion. J Therm Sci 9: 169-175.
- [8] Konsur B, Megaridis CM (1999) Fuel preheat effects on soot-field structure in laminar gas jet diffusion flames burning in 0-g and 1-g. Combust Flame 116: 334-347.
- [9] Yang WW, Blasiak W (2005) Numerical study of fuel temperature influence on single gas jet combustion in highly preheated and oxygen deficient air. Energy 30: 385-398.
- [10] Poorhoseini SH, Moghiman M (2014) Experimental study on the effect of coal injection on structure, radiation, temperature and thermal efficiency of natural gas diffusion flames. Modares Mech Eng 14(7): 163-168. (In Persian)
- [11] Poorhoseini SH, Moghiman M (2015) An experimental study on the effect of synchronous combustion of gasoil on luminosity and radiative heat transfer of natural gas flame. Modares Mech Eng 14(15): 11-16. (In Persian)
- [12] Javadi SM, Moghiman M (2011) Experimental study of natural gas temperature effects on the flame luminosity and NO emission in a 120 kW boiler. Fuel Combust 4(1): 87-95. (In Persian)
- [13] Abanades S, Flamant G (2007) Experimental study and modeling of a high-temperature solar chemical reactor for hydrogen production from methane cracking. Int J Hydrogen Energ 32(10): 1508-1515.