Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(1) (2022) 47-50
DOI: 10.22060/mej.2021.19792.7114

Study of The Effect of Wall Temperature and Oxidant Structure on Temperature Distribution and NO Emission in Non-Premixed Combustion Furnace

A. Tajdani[1], S. A. Hashemi[1] , E. Ebrahimi Fordoei[2]

[1] Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
[2] Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: The aim of this study was to investigate the effect of the thermal condition of furnace wall and oxidant structure on NOx emission and thermal conditions inside the non-premixed combustion furnace. For this purpose, non-premixed combustion furnace simulations have been performed using OpenFOAM software. Standard k-ε turbulence model, modified eddy dissipation concept combustion model, and discrete ordinates radiation model are used in numerical simulations. In order to analyze the results of numerical simulations, chemical calculations using a well stirred reactor have also been considered. According to the results, increasing the furnace wall temperature to reach thermal insulation conditions leads to a significant increase in the average and maximum temperature inside the combustion chamber and transfers the combustion regime from flameless to high temperature. In addition, the replacement of carbon dioxide with nitrogen will be accompanied by a decrease in the combustion temperature due to physical and chemical differences between the two species. According to the results, increasing the wall temperature, despite reducing the heat loss, leads to an increase in NOx in the high temperature combustion regime. The use of carbon dioxide instead of nitrogen in an oxidizer can be considered as a way to reduce heat loss while reducing NOx emission from the non-premixed combustion furnace.

Review History:

Received: Mar. 26, 2021
Revised: Jun. 29, 2021
Accepted: Aug. 25, 2021
Available Online: Aug. 30, 2021

Keywords:

NOx
Wall temperature
Oxidant structure
Combustion regime
Non-premixed combustion

1- Introduction

Despite extensive studies to address the challenges of global warming due to greenhouse gas emissions, the release of NOx and CO pollutants, and the increase in efficiency, research on combustion systems to address these challenges continues [1]. The thermal conditions of the fuel, air, and furnace walls can greatly affect the performance of non-premixed combustion systems. Xu et al. [2] investigated the effect of wall temperature on flame stability and thermal performance of non-premixed combustion furnaces under different combustion regimes. The results show that lowering the wall temperature leads to a higher Ignition Delay Time (IDT) and heat loss from the furnace wall. Lower wall temperatures also lead to a transition from conventional combustion to a flameless regime in which NOx is significantly reduced. Oxidant structure is another parameter that is of great importance in reducing the emission of pollutants and greenhouse gases. He et al. [3] studied the effect of oxidants O2/N2, O2/CO2, and O2/H2O on the formation of CO and its pathways. For O2/CO2 oxidant, the presence of CO2 in the reactions leads to a higher contribution of CO2+H⇌CO+OH and CH2(S)+O2⇌CH2O+CO at further emission of CO pollutant. In the present study, the emission of NOx and the temperature distribution have been studied in the non-premixed combustion chamber.

*Corresponding author's email: Hashemi@kashanu.ac.ir

2- Geometry and Boundary Conditions

The non-premixed combustion furnace of the University of Lisbon [13], in which fuel is injected into the furnace from cylinders with a diameter of 4 mm and air through a circular duct with inner and outer diameters of 6 and 15 mm, has been selected for numerical simulation. The fuel is methane and preheated air is used as an oxidant. The combustion chamber is a cylinder with a diameter of 150 mm and a length of 300 mm. Combustion products are exited from the furnace through a chimney with a diameter of 85 mm and a length of 150 mm. Details of dimensions and boundary conditions can be found at Ref. [1].

3- Numerical Conditions

OpenFOAM software has been used to perform numerical simulations. Modeling of turbulence, combustion, and radiation heat transfer has been performed using standard k-ε, modified EDC, and DO models. In addition, chemical calculations were performed using a well-stirred-reactor by considering C1C3 chemical kinetics.

4- Results and Discussion

4- 1- Validation of numerical models and solver

Fig. 1 shows the radial variations of temperature and dry volume fraction of oxygen at axial distances of 90 and 210 mm. Solvers and numerical modeling are in good agreement

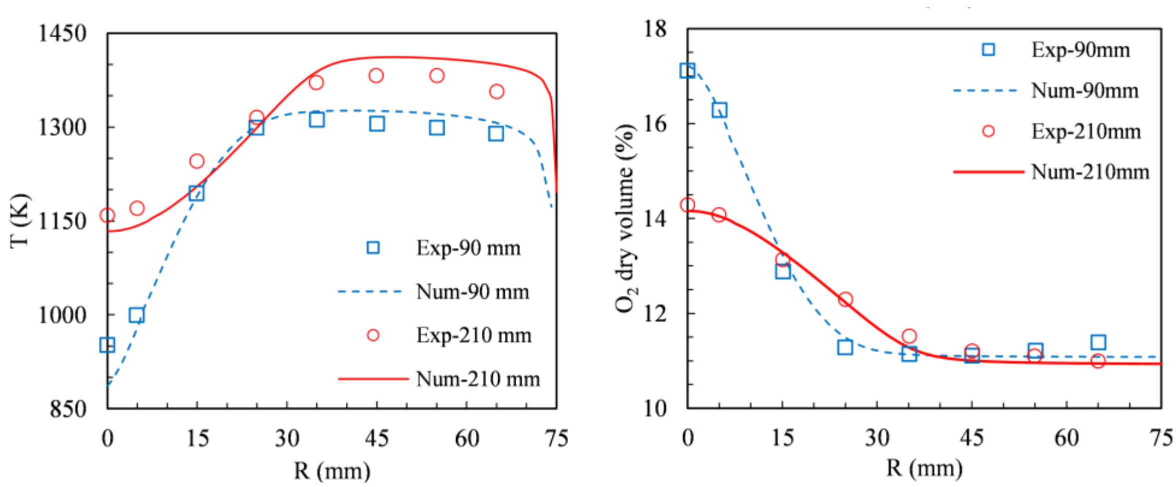


Fig. 1. Comparison between radial variations of temperature and oxygen dry volume fraction with measurements at axial distances 90 and 210 mm

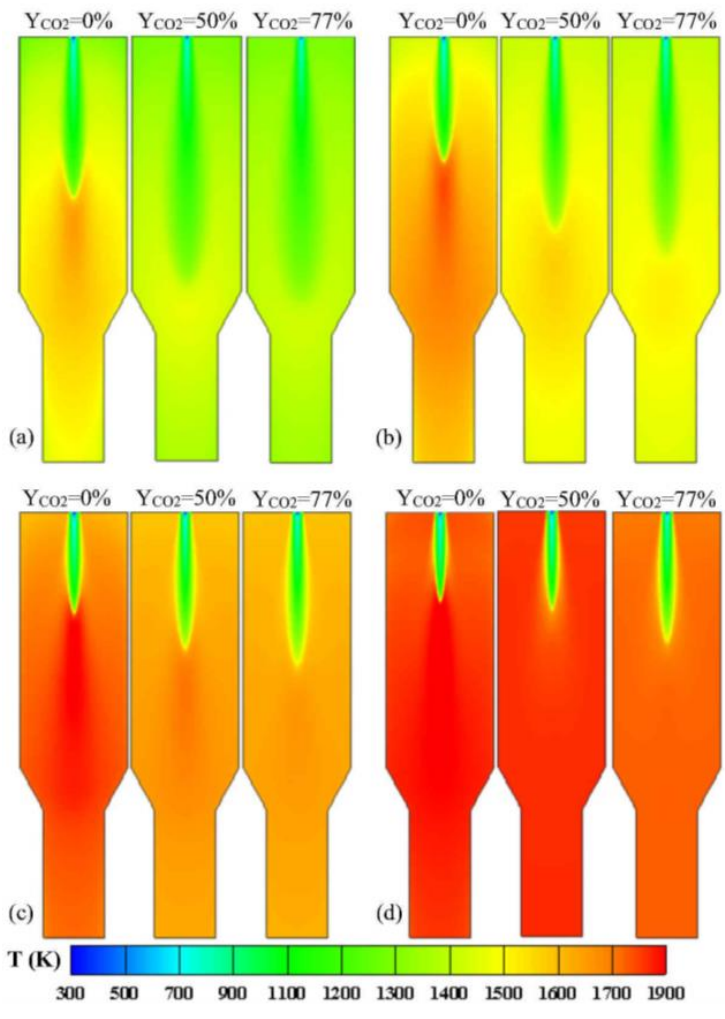


Fig. 2. Temperature contours under different oxidant structures and wall thermal conditions

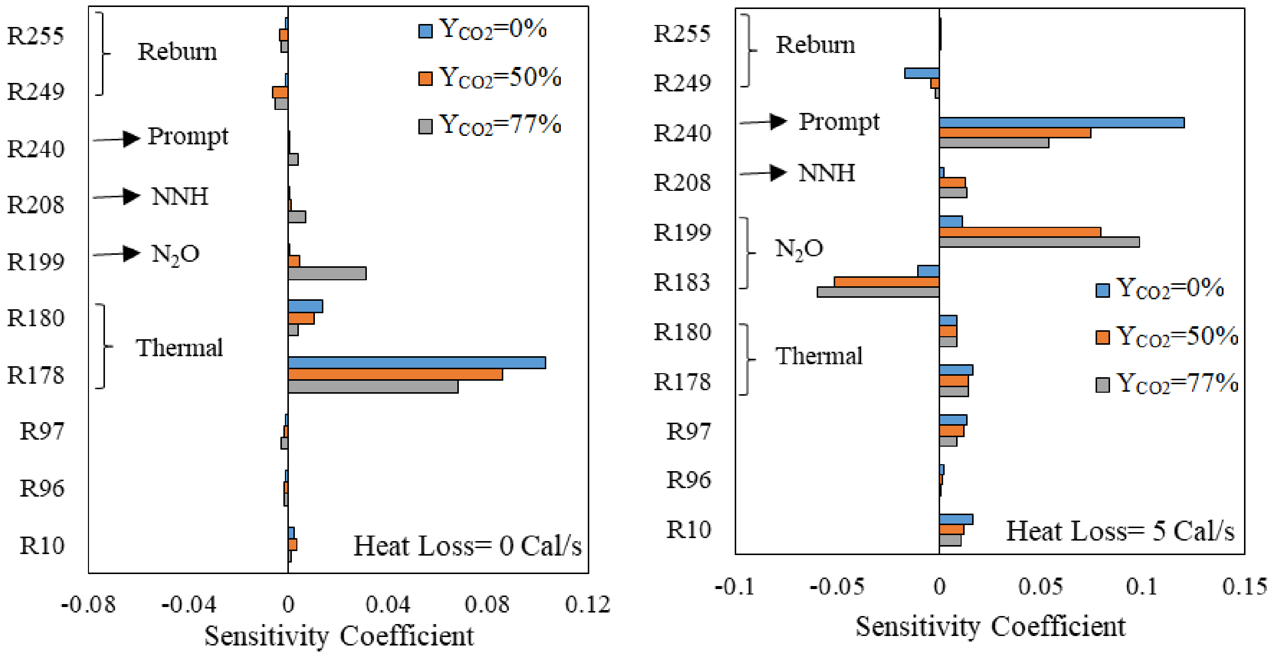


Fig. 3. Sensitivity analyses of chemical reactions with heat loss value 0 and 5 cal/s under the different values of CO2 injection in oxidant for NOx emission

with experimental measurements. The average error of numerical solution is less than 5% for temperature and less than 6% for the dry volume fraction of oxygen.

4- 2- Effect of wall thermal conditions and oxidant structure on temperature

Fig. 2 shows the temperature contour under the use of different oxidant structures and thermal conditions of the furnace wall. By increasing the furnace wall temperature from 1200 K to the insulation wall, the heat loss is significantly reduced, which leads to an increase in the temperature of the gases in the non-premixed combustion furnace. On the other hand, the injection of carbon dioxide into the oxidant reduces the maximum combustion temperature and leads to a more uniform temperature distribution which is true in all thermal conditions. The main reason for the decrease in the maximum temperature and the increase in the uniformity of the temperature distribution is the difference between the physical and chemical properties of CO2 and N2.

4- 3- The effect of wall thermal conditions and oxidant structure on the NOx emission

Increasing the wall temperature leads to significant emission of NOx pollutants. Changes in thermal conditions and, consequently, the reaction pathways are a major factor in the rise of NOx emission. In all oxidant structures, NOx emission increases significantly with the transition from flameless to high temperature combustion regime. According to the results, the use of low heat loss conditions is acceptable only under the flameless regime in terms of NOx emission. Fig. 3 shows the sensitivity analysis of NOx species with changes in wall thermal and oxidant structure (reactions are related to the GRI3.0 mechanism). Increasing CO2 injection reduces the contribution of the thermal mechanism in NOx production. The main reason for the decrease in the maximum temperature of the combustion process is higher amounts of injection of CO2 in the oxidant. The higher heat capacity of CO2 and the presence of CO2 in endothermic reactions are two important factors in reducing the flame temperature.

5- Conclusions

In the present study, the effect of wall thermal conditions and oxidant structure of non-premixed furnaces on temperature distribution and NOx emission has been studied. The results show that increasing the temperature of the furnace wall leads to an increase in the maximum temperature and a reduction in the IDT. Also, the main mechanism of NOx emission under the methane-air Moderate or Intense Low-oxygen Dilution (MILD) regime is prompt while, the main mechanism of NOx emission for oxygen-enriched and oxy-fuel combustion is N2O-intermediate.

References

[1] E. Ebrahimi Fordoei, K. Mazaheri, A. Mohammadpour, Numerical study on the heat transfer characteristics, flame structure, and pollutants emission in the MILD methane-air, oxygen-enriched and oxy-methane combustion, Energy, 218 119524.

[2] S. Xu, Y. Tu, P. Huang, C. Luan, Z. Wang, B. Shi, H. Liu, Z. Liu, Effects of wall temperature on methane MILD combustion and heat transfer behaviors with non-

preheated air, Applied Thermal Engineering, (2020) 115282.

[3] Y. He, C. Zou, Y. Song, J. Luo, H. Jia, W. Chen, J. Zheng, C. Zheng, Comparison of the characteristics and mechanism of CO formation in O2/N2, O2/CO2 and O2/H2O atmospheres, Energy, 141 (2017) 1429-1438.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Tajdani, S. A. Hashemi , E. Ebrahimi Fordoei , Study of The Effect of Wall Temperature and Oxidant Structure on Temperature Distribution and NO Emission in Non-Premixed Combustion Furnace, Amirkabir J. Mech Eng., 54(1) (2022) 47-50.

DOI: 10.22060/mej.2021.19792.7114

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۱، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۴۹ تا ۲۶۶
DOI: 10.22060/mej.2021.19792.7114

مطالعه تأثیر دمای دیواره و ساختار اکسنده بر توزیع دما و ناکس کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته

امین تاجدانی[۱]، سید عبدالمهدی هاشمی[۱*]، اسماعیل ابراهیمی فردویی[۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

خلاصه: هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر شرایط حرارتی حاکم بر دیواره کوره و ساختار اکسنده بر انتشار آلاینده ناکس و شرایط دمایی داخل کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته است. بدین منظور شبیه‌سازی کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته با استفاده از نرم افزار اپن‌فوم انجام شده است. در شبیه‌سازی‌های عددی از مدل آشفتگی کی- اپسیلون استاندارد، مدل احتراقی مفهوم اتلاف گردابه اصلاح شده و مدل تشعشعی فاز گسسته استفاده شده است. همچنین به‌منظور تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، محاسبات شیمیایی با استفاده از واکنشگاه کاملاً مخلوط مورد توجه قرار گرفته است. مطابق با نتایج، افزایش دمای دیواره کوره تا رسیدن به شرایط عایق حرارتی منجر به افزایش قابل توجه دمای متوسط و بیشینه درون محفظه احتراق گردیده و رژیم احتراقی را از بدون شعله به دما بالا منتقل می‌کند. علاوه‌بر این جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن همراه با کاهش دمای محفظه احتراق به علت تفاوت‌های فیزیکی و شیمیایی این دو گونه خواهد بود. براساس نتایج، افزایش دمای دیواره با وجود کاهش اتلاف حرارتی منجر به افزایش ناکس در رژیم احتراقی دما بالا می‌گردد. استفاده از دی‌اکسید کربن به جای نیتروژن در ساختار اکسنده می‌تواند روشی راهگشا در کاهش اتلاف حرارتی همزمان با کاهش ناکس منتشر شده از کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته مورد توجه قرار گیرد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۶
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸

کلمات کلیدی:
ناکس
دمای دیواره
ساختار اکسنده
رژیم احتراقی
احتراق غیرپیش‌آمیخته

۱- مقدمه

گرمایش زمین بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای، انتشار آلاینده‌های سمی ناکس و مونوکسید کربن و افزایش بازدهی سه چالش عمده و اساسی در ارتباط با تأمین انرژی با استفاده از احتراق سوخت‌های فسیلی در صنایع و نیروگاه‌های حرارتی می‌باشد [۱]. از این‌رو به منظور افزایش بازدهی و کاهش انتشار آلاینده دی‌اکسید کربن به عنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای، روش‌ها و سیستم‌های مختلفی به کار گرفته شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به احتراق اکسیژن غنی و سوخت- اکسیژن [۲]، احتراق بدون شعله [۳] و استفاده از مشعل‌های چرخشی [۴] اشاره کرد. علی رغم مطالعات گسترده انجام شده جهت رفع و کاهش چالش‌های بیان شده، تحقیق بر روی سیستم‌های احتراقی به منظور دست‌یابی به فرآیندی با حداکثر بازدهی و حداقل انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای به صورت گسترده ادامه دارد.

شرایط حرارتی سوخت و هوای ورودی و همچنین دیواره‌های کوره می‌توانند تأثیر زیادی روی عملکرد سیستم‌های احتراقی به ویژه در کوره‌های احتراق غیرپیش‌آمیخته به عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌های تأمین انرژی در صنایع و نیروگاه‌ها داشته باشند. ژو و همکاران [۵] در مطالعه خود به بررسی تأثیر دمای دیواره روی پایداری شعله و عملکرد حرارتی کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته تحت رژیم‌های مختلف احتراقی پرداختند. در این بررسی که به صورت تجربی و عددی می‌باشد از یک کوره در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شده است. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان دهنده آن است که کاهش دمای دیواره منجر به افزایش اتلاف حرارت از دیواره کوره گردیده و سبب می‌شود تا زمان تأخیر در اشتعال افزایش پیدا کند. مطابق با این مطالعه کاهش دمای دیواره منجر به انتقال از رژیم احتراق معمولی به رژیم احتراق بدون شعله شده که در آن انتشار ناکس به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این حال حد پایین دمایی وجود دارد که به ازای دمای دیواره کوره کمتر از آن تشکیل رژیم احتراق بدون شعله پایدار امکان‌پذیر نخواهد بود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که با وجود افزایش اتلاف حرارتی در اثر کاهش دمای دیواره برای انتقال از احتراق معمولی به رژیم بدون شعله، میزان حرارت استخراج شده از فرآیند احتراق بدون شعله به علت افزایش قابل توجه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات : Hashemi@kashanu.ac.ir

انتقال حرارت تشعشعی، بیشتر از احتراق معمولی است. زگو و همکاران [۶ و ۷] در مطالعه‌ای به بررسی تجربی حرارت استخراج شده و مشخصه‌های احتراقی از کوره آزمایشگاهی احتراق غیرپیش‌آمیخته با استفاده از هوای پیش‌گرم شده پرداختند. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که افزایش حرارت مستخرج شده از فرآیند احتراق می‌تواند ضمن کاهش قابل توجه بیشینه دما، منجر به تغییر قابل توجه میزان انتشار آلاینده‌ها گردد. مقدسی و همکاران [۸] به مطالعه تأثیر پیش گرمایش هوا بر روی شرایط حرارتی و انتشار آلاینده‌ها تحت شرایط احتراقی سوخت- اکسیژن پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در احتراق سوخت- اکسیژن محل تشکیل شعله و بیشینه مونوکسید کربن داخل کوره در ناحیه بازچرخشی بوده و تشکیل مونوکسید کربن از طریق هیدروکربن‌های سنگین با افزایش دمای پیش‌گرمایش هوا سرکوب می‌شود.

ساختار اکسنده پارامتر دیگری است که در سال‌های اخیر اهمیت آن بر روی کاهش انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای و همچنین رفتار شعله در کوره‌های احتراقی مورد توجه قرار گرفته است. هه و همکاران [۹] تأثیر سه ساختار اکسنده O_2/N_2، O_2/CO_2 و O_2/H_2O را بر روی تشکیل مونوکسید کربن و مسیرهای آن به صورت تجربی و شبیه‌سازی راکتور پلاگ مطالعه کردند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که برای اکسنده O_2/CO_2، حضور دی‌اکسید کربن در واکنش‌های شیمیایی منجر به افزایش سهم مسیرهای واکنشی $CO_2+H \rightleftharpoons CO+OH$ و $CH_2(S)+CO_2 \rightleftharpoons CH_2O + CO$ در انتشار هر چه بیشتر آلاینده CO می‌شود. در این ساختار اکسنده، مسیر $CO_2 \rightarrow CO$ به صورت قابل توجهی تقویت شده و مسیرهای $CH_3 \rightarrow CH_2OCO \rightarrow CH_2O$ و $CH_3 \rightarrow CH_2OCO \rightarrow CO$ در تشکیل و انتشار مونوکسید کربن نقش ویژه‌ای ایفا می‌کنند. در اکسنده O_2/H_2O، مسیر تبدیل مونوکسید کربن به دی‌اکسید کربن به علت افزایش رادیکال هیدروکسیل پر رنگ‌تر شده و مسیرهای $CH_3OH \rightarrow CH_2O \rightarrow CH_2O$ و $CH_3 \rightarrow (CH_2(S)) \rightarrow CH_3OH \rightarrow CH_2OH$ نقش به سزایی در انتشار CO ایفا می‌کنند. لیو و همکاران [۱۰] به مطالعه عددی و تجربی تأثیر جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن روی تأخیر در زمان اشتعال در احتراق متان تحت دماها و فشارهای عملکردی مختلف پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر آن است که اثرات فیزیکی ناشی از جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن تأثیر کمی در دماها و فشارهای مختلف بر روی تأخیر در آغاز فرآیند اشتعال دارد در حالی که اثرات شیمیایی منجر به تغییرات اساسی و گسترده بر روی تأخیر در اشتعال در اثر این جایگزینی می‌شود. همچنین افزایش دما منجر به کاهش زمان تأخیر در اشتعال احتراق متان به علت فعال‌تر شدن واکنش $CO+H+M \rightleftharpoons HCO+M$ شده، در حالی که کاهش فشار افزایش زمان تأخیر در اشتعال از طریق مسیر واکنشی $2CH_3(+M) \rightleftharpoons C_2H_6(+M)$ را به همراه دارد. گلاربورگ و بنتزن [۱۱] نیز در مطالعه دیگری به بررسی اثرات شیمیایی تزریق مقادیر بالای دی‌اکسید کربن درون اکسنده تحت شرایط احتراقی سوخت- اکسیژن پرداختند. مطابق با نتایج ایشان، رقابت دی‌اکسید کربن با اکسیژن برای واکنش با اتم هیدروژن منجر به تشکیل مونوکسید کربن از طریق واکنش $CO_2+H \rightleftharpoons CO+OH$ می‌گردد. همچنین مطابق با نتایج این مطالعه، واکنش رادیکال‌های هیدروکربنی با دی‌اکسید کربن خود یکی دیگر از مسیرهای اصلی در تولید مونوکسید کربن می‌باشد. وانگ و همکاران [۱۲] به صورت عددی و تجربی سرعت‌های سوزش آرام با استفاده از مخلوط‌های احتراقی $CH_4/O_2/N_2$ و $CH_4/O_2/CO_2$ تحت فشارهای عملکردی مختلف را اندازه‌گیری کردند. نتایج بدست آمده بیانگر کاهش سرعت سوزش شعله با جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن در سمت اکسنده می‌باشد. مطابق با تحلیل سینتیکی انجام شده، واکنش معکوس $CO_2+H \rightleftharpoons CO+OH$ در رقابت با واکنش $H+O_2 \rightleftharpoons O+OH$ منجر به تأخیر در انتشار شعله و کاهش سرعت سوزش آرام می‌شود. همچنین رقابت برای مصرف رادیکال هیدروژن در واکنش $H+O_2 \rightleftharpoons O+OH$ با رقابت در مصرف CH_3 در واکنش‌های $CH_3+H(+M) \rightleftharpoons CH_4(+M)$ و $2CH_3(+M) \rightleftharpoons C_2H_6$ منجر به رفتاری غیریکنواخت برای هر دو مخلوط اکسنده بررسی شده می‌شود.

با توجه به مطالب بیان شده، شرایط حاکم بر دیواره‌های محفظه احتراق و ساختار اکسنده می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر روی شرایط و رژیم احتراقی داشته باشند. در اکثر مطالعاتی که تا کنون انجام شده، تأثیر شرایط حرارتی حاکم بر دیواره تنها در ترکیب اکسنده O_2/N_2 بر روی انتشار مونوکسید کربن و رفتار شعله مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی بحث تأثیر ساختار اکسنده بر روی مکانیسم‌های انتشار آلاینده ناکس و توزیع دما داخل کوره مورد توجه قرار نگرفته است. از این‌رو در مطالعه حاضر به بررسی انتشار آلاینده ناکس به عنوان یکی از اصلی‌ترین آلاینده‌های زیست محیطی احتراق متان و توزیع دمای درون محفظه احتراق پرداخته شده است. بدین منظور از شبیه‌سازی کوره احتراق آزمایشگاهی دانشگاه لیسبون همراه با

محاسبات سینتیکی با استفاده از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها برای دماهای دیواره کوره ۱۲۰۰، ۱۴۰۰، ۱۶۰۰ کلوین و همچنین به کارگیری شرایط عایق حرارتی برای دیواره کوره انجام شده است. از طرفی به منظور بررسی تأثیر ساختار اکسنده روی میزان انتشار آلاینده ناکس و توزیع دما، مقادیر تزریق ۵۰ و ۷۷ درصدی دی‌اکسید کربن درون اکسنده به عنوان شرایط احتراق اکسیژن غنی و سوخت- اکسیژن در نظر گرفته شده و با شرایط احتراق سوخت- هوا مقایسه شده است.

۲- شرایط حل عددی

۲- ۱- هندسه و شرایط مرزی حاکم بر کوره

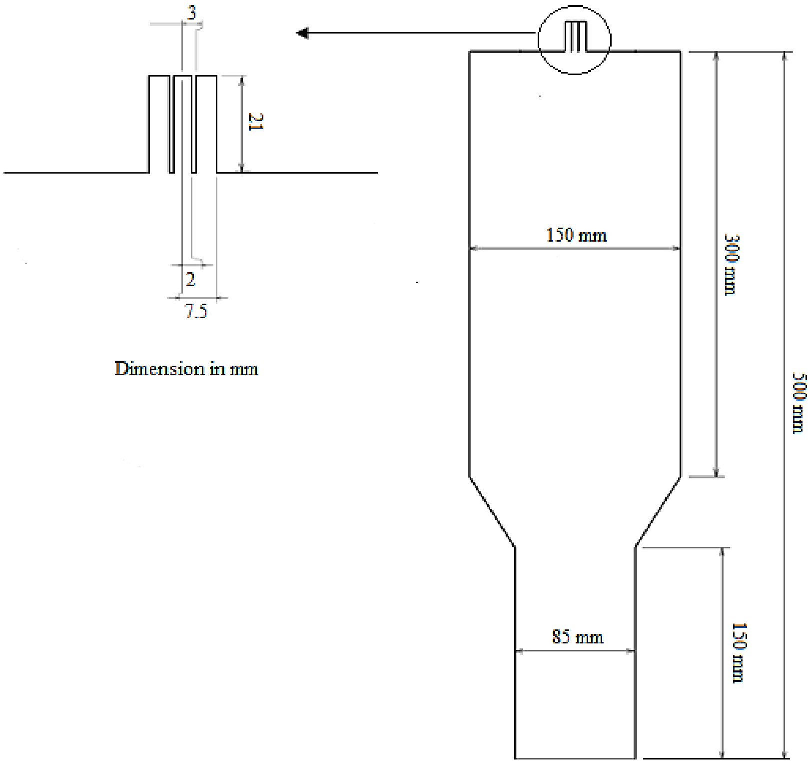
کوره آزمایشگاهی احتراق غیرپیش‌آمیخته دانشگاه لیسبون [۱۳] به منظور اعتبارسنجی و شبیه‌سازی‌های عددی انتخاب شده است. مطابق با شکل ۱، سوخت از قسمت میانی کوره و از طریق مجرای دایروی شکلی به قطر ۴ میلی‌متر و طول ۲۱ میلی‌متر به داخل کوره تزریق می‌شود. هوای مورد نیاز برای وقوع فرآیند احتراق از طریق مجرای حلقوی شکل پیرامون ورودی سوخت به قطر داخلی ۶ و قطر خارجی ۱۵ میلی‌متر به داخل کوره تزریق می‌شود. در مطالعه تجربی انجام شده از متان خالص به عنوان سوخت و از هوای پیش‌گرم شده به عنوان اکسنده استفاده شده است. محفظه احتراق، استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ و طول ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد که انتهای آن به صورت یک نازل همگرا می‌باشد. طول قسمت نازلی شکل کوره ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. گازهای داغ حاصل از احتراق از طریق دودکشی با قطر ۸۵ و طول ۱۵۰ میلی‌متر به سمت خارج از کوره هدایت می‌شوند.

برای اعتبارسنجی و انجام شبیه‌سازی‌های عددی جهت بررسی اثرات شرایط حرارتی دیواره و ساختار اکسنده از کوره‌های حرارتی با توان ۱۰ و ۱۵/۶ کیلوواتی استفاده شده است. علت استفاده از کوره ۱۰ کیلوواتی در اعتبارسنجی‌ها، وجود داده‌های گسترده برای تغییرات شعاعی دما و گونه‌ها در فواصل محوری مختلف می‌باشد؛ در حالی که کوره ۱۵/۶ کیلووات با هدف بررسی‌های مورد نظر در مطالعه حاضر در نظر گرفته شده است (استفاده از کوره با توان ۱۰ کیلووات جهت بررسی‌های مورد نظر در مقادیر بالای تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسنده منجر به خاموشی شعله می‌شود؛ از این‌رو از کوره با توان حرارتی بالاتر جهت بررسی‌ها استفاده شده است). سرعت ورود سوخت و هوا برای کوره ۱۰ کیلووات به ترتیب برابر با ۲۴/۴ و ۱۰۴ متر بر ثانیه با دماهای ۲۹۳ و ۷۷۳ کلوین می‌باشد در حالی که سرعت ورودی سوخت و هوا برای کوره ۱۵/۶ کیلووات به ترتیب برابر با ۳۸/۱ و ۱۵۵ متر بر ثانیه با دمای ۲۹۳ و ۹۷۳ کلوین می‌باشد. دمای محفظه احتراق دارای توزیعی تقریباً یکنواخت بوده و برای کوره ۱۰ کیلوواتی برابر ۱۱۷۳ کلوین و برای کوره ۱۵/۶ کیلووات ۱۲۶۱ کلوین است. سایر دیواره‌ها شامل دیواره‌های ورودی سوخت و هوا و دیواره دودکش مطابق با مطالعه تجربی عایق می‌باشند که برای آن‌ها از شرط مرزی عایق حرارتی در کوره با توان‌های ۱۰ و ۱۵/۶ کیلووات استفاده شده است.

۲- ۲- شرایط حل عددی

در مطالعه حاضر از نرم افزار متن باز اپن فوم برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته استفاده شده است. این کد بر اساس زبان برنامه‌نویسی C++ نوشته شده و دارای تعداد زیادی کتابخانه کاربردی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است. با کمک این کتابخانه‌ها می‌توان حلگرهای لازم برای حل عددی معادلات را فراهم نمود. از مزایای این کد متن‌باز، امکان اضافه کردن و یا اصلاح مدل‌های مختلف فیزیکی و تکمیل آن در ابزار محاسباتی است که در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی احتراقی و محاسبه ضرایب جذب و گسیل تشعشعی کتابخانه‌های مربوط به آن‌ها اصلاح شده‌اند. استفاده از تقریب‌های مختلف برای مدل‌سازی عبارات مختلف در معادلات بقا و همچنین استفاده از مدل‌های مختلف به‌منظور مدل‌سازی خواص فیزیکی همراه با خطاهایی در حل عددی می‌باشد که در مطالعه حاضر با تکیه بر انتخاب مدل‌های با دقت بالا این خطاها به حداقل رسیده است

از آنجا که هندسه کوره دانشگاه لیسبون استوانه‌ای شکل می‌باشد، از حل متقارن محوری جهت انجام شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است. با توجه به مطالعه انجام شده توسط ربولا و همکاران [۱۴] که به منظور انتخاب بهترین مدل آشفتگی جهت شبیه‌سازی کوره احتراقی حاضر انجام شده است، مدل کی- اپسیلون استاندارد جهت مدل‌سازی عبارت تنش رینولدز در معادله تکانه خطی آشفته استفاده شده است. با توجه به اینکه کوره مورد بررسی در مطالعه تجربی در هر دو رژیم احتراق معمولی و احتراق بدون شعله مورد بررسی قرار گرفته است، از این‌رو لازم است تا مدل احتراقی به گونه‌ای انتخاب شود که قادر به پیش‌بینی صحیحی از عبارت برهم‌کنش میان آشفتگی و احتراق باشد. با توجه به مطالعات گسترده انجام شده در ارتباط با مدل‌های احتراقی در شبیه‌سازی رژیم‌های احتراق معمولی و بدون شعله، مدل مفهوم اتلاف گردابه اصلاح شده توسط ابراهیمی و مظاهری [۱۵ و ۱۶] جهت محاسبه ترم برهم‌کنش میان آشفتگی و احتراق در مطالعه



شکل ۱. هندسه و ابعاد کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته

Fig. 1. Geometry and dimensions of non-premixed combustion furnace

جدول ۱. مقادیر در نظر گرفته شده برای ضرایب جذب و گسیل دی‌اکسید کربن در طول موج‌های مختلف در مدل جمع وزنی گازهای خاکستری

Table 1. Considered values for emission and absorption coefficients of carbon dioxide in the different wavelengths at weighted-sum-of-gray-gases-model

کسر جرمی تزریق دی‌اکسید کربن (٪)	طول موج (میکرومتر µm) ۰-۲/۵	۲/۵-۳	۳-۴	۴-۵	۵-۹	۹-۲۰
۰	۰	۰/۷۵	۰	۰/۷۸	۰	۰/۷۲
۵۰	۰	۰/۷۹	۰	۰/۸۲	۰	۰/۷۵
۷۷	۰	۰/۸۲	۰	۰/۸۵	۰	۰/۷۸

حاضر استفاده شده است. با توجه به اهمیت بالای سینتیک شیمیایی در پیش‌بینی صحیح آلاینده‌های حاصل از احتراق، از مکانیسم GRI۳/۰ با ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش شیمیایی [۱۷] استفاده شده است. موضوع مهم دیگر جهت مدل‌سازی در شبیه‌سازی جریان‌های واکنشی، عبارت انتقال حرارت تشعشعی در معادله انرژی می‌باشد. در مطالعه حاضر به منظور مدل‌سازی این ترم از مدل جهات گسسته با محاسبه ضرایب جذب و گسیل از طریق مدل جمع وزنی گازهای خاکستری با در نظر گرفتن ۶ باند مختلف (جدول ۱) با توجه به استفاده از دی‌اکسید کربن درون جریان اکسنده مطابق با مطالعه مقدسی و همکاران [۸] استفاده شده است. به منظور بر طرف کردن کوپلینگ میان سرعت و فشار از الگوریتم پیمپل که ترکیبی از الگوریتم‌های پیزو و سیمپل می‌باشد، استفاده شده است. برای حصول دقت کافی و جلوگیری از مشکل نفوذ عددی در شبیه‌سازی کوره احتراق بدون شعله، گسسته‌سازی عبارات مختلف معادلات بقا با استفاده از روش آپویند مرتبه دوم انجام شده است. معیار همگرایی حل نیز شامل رسیدن باقی‌مانده تمامی کمیت‌ها به کمتر از $۱۰^{-۷}$ در هر گام زمانی و کاهش تغییرات دما و سرعت در خروجی کوره به کمتر از ۰/۵ درصد در مدت زمان ۰/۵ ثانیه می‌باشد.

جدول ۲. شرایط حرارتی دیواره کوره، اتلاف حرارتی از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل و ساختار اکسنده در شبیه‌سازی عددی و محاسبات سینتیکی

Table 2. Heat condition of wall furnace, heat loss of well stirred reactor and oxidant structure in the numerical simulation and kinetic calculations

ردیف	شرایط حرارتی دیواره کوره	کسر جرمی ساختار اکسنده (٪)	ردیف	اتلاف حرارتی واکنشگاه	کسر جرمی ساختار اکسنده (٪)
۱	T_w=۱۲۰۰ K	Y_{O2}=۲۳٪ و Y_{CO2}=۰٪ و Y_{N2}=۷۷٪	۱	۰ cal/s	Y_{O2}=۱۵٪ و Y_{CO2}=۰٪ و Y_{N2}=۸۵٪
۲	T_w=۱۴۰۰ K	Y_{O2}=۲۳٪ و Y_{CO2}=۰٪ و Y_{N2}=۷۷٪	۲	۰ cal/s	Y_{O2}=۱۵٪ و Y_{CO2}=۰٪ و Y_{N2}=۸۵٪
۳	T_w=۱۶۰۰ K	Y_{O2}=۲۳٪ و Y_{CO2}=۰٪ و Y_{N2}=۷۷٪	۳	۰ cal/s	Y_{O2}=۱۵٪ و Y_{CO2}=۰٪ و Y_{N2}=۸۵٪
۴	عایق حرارتی	Y_{O2}=۲۳٪ و Y_{CO2}=۰٪ و Y_{N2}=۷۷٪			
۵	T_w=۱۲۰۰ K	Y_{O2}=۲۳٪ و Y_{CO2}=۵۰٪ و Y_{N2}=۲۷٪	۴	۲/۵ cal/s	Y_{O2}=۱۵٪ و Y_{CO2}=۵۰٪ و Y_{N2}=۳۵٪
۶	T_w=۱۴۰۰ K	Y_{O2}=۲۳٪ و Y_{CO2}=۵۰٪ و Y_{N2}=۲۷٪	۵	۲/۵ cal/s	Y_{O2}=۱۵٪ و Y_{CO2}=۵۰٪ و Y_{N2}=۳۵٪
۷	T_w=۱۶۰۰ K	Y_{O2}=۲۳٪ و Y_{CO2}=۵۰٪ و Y_{N2}=۲۷٪	۶	۲/۵ cal/s	Y_{O2}=۱۵٪ و Y_{CO2}=۵۰٪ و Y_{N2}=۳۵٪
۸	عایق حرارتی	Y_{O2}=۲۳٪ و Y_{CO2}=۵۰٪ و Y_{N2}=۲۷٪			
۹	T_w=۱۲۰۰ K	Y_{O2}=۲۲٪ و Y_{CO2}=۷۷٪ و Y_{N2}=۱٪	۷	۵ cal/s	Y_{O2}=۱۵٪ و Y_{CO2}=۷۷٪ و Y_{N2}=۸٪
۱۰	T_w=۱۴۰۰ K	Y_{O2}=۲۲٪ و Y_{CO2}=۷۷٪ و Y_{N2}=۱٪	۸	۵ cal/s	Y_{O2}=۱۵٪ و Y_{CO2}=۷۷٪ و Y_{N2}=۸٪
۱۱	T_w=۱۶۰۰ K	Y_{O2}=۲۲٪ و Y_{CO2}=۷۷٪ و Y_{N2}=۱٪	۹	۵ cal/s	Y_{O2}=۱۵٪ و Y_{CO2}=۷۷٪ و Y_{N2}=۸٪
۱۲	عایق حرارتی	Y_{O2}=۲۲٪ و Y_{CO2}=۷۷٪ و Y_{N2}=۱٪			

۳- شرایط حاکم بر شبیه‌سازی کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته

به منظور بررسی شرایط حرارتی حاکم بر دیواره‌های کوره و همچنین تأثیر ساختار اکسنده بر انتشار ناکس و توزیع دمای داخل محفظه احتراق، شبیه‌سازی‌های مختلف در نظر گرفته شده برای کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته مطابق با جدول ۲ انجام شده است. اثر شرایط حرارتی حاکم بر دیواره‌ها با استفاده از تغییرات دمای دیواره کوره و در نظر گرفتن مقادیر دمایی ۱۲۰۰، ۱۴۰۰، ۱۶۰۰ کلوین و همچنین در نظر گرفتن شرط عایق حرارتی بر روی دیواره کوره انجام شده است. بررسی تأثیر ساختار اکسنده نیز شامل در نظر گرفتن مقادیر تزریق ۰، ۵۰ و ۷۷ درصدی کسر جرمی دی‌اکسید کربن درون اکسنده می‌باشد. همچنین برای تحلیل نتایج محاسبات سینتیکی با استفاده از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل مورد توجه قرار گرفته است. در محاسبات سینتیکی نیز شرایط حرارتی با تغییر در اتلاف حرارت از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل مورد مطالعه قرار گرفته در حالی که تأثیر ساختار اکسنده بر انتشار آلاینده‌ها مشابه با شبیه‌سازی کوره احتراق بدون شعله با در نظر گرفتن رژیم احتراقی با استفاده از تزریق مقادیر ۰، ۵۰ و ۷۷ درصدی دی‌اکسید کربن درون اکسنده انجام شده است. در محاسبات سینتیکی نیز از کسر جرمی اکسیژن ۱۵ درصدی جهت تشکیل رژیم‌های احتراقی دما بالا و بدون شعله مشابه با شرایط حاکم بر کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته استفاده شده است.

۴- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از حل عددی کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته ارائه می‌شود. همان‌گونه که پیشتر بیان شد، به‌منظور تحلیل نتایج حاصل از حل عددی، محاسبات سینتیکی با استفاده از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل که شرایط بسیار نزدیکی با احتراق دما بالا و احتراق بدون شعله دارد، انجام شده است. در حل به کمک واکنشگاه اختلاط ایده‌آل از آنالیز حساسیت واکنش‌های شیمیایی به عنوان یکی از ابزارهای کیفی جهت تعیین وابستگی حل به پارامترهای مختلف استفاده شده است. متداول‌ترین روش جهت تحلیل حساسیت، آنالیز مرتبه اول کسر گونه می‌باشد که در آن صرف نظر از هرگونه غیرخطی بودن مسئله، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل خطی که تشکیل یک ماتریس را می‌دهند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای محاسبه ضرایب حساسیت واکنشگاه اختلاط ایده‌آل، بردار معادلات حاکم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F(\phi(\alpha),\alpha)=0 \qquad (1)$$

در معادله فوق ϕ بیانگر متغیرهای حل و α بیانگر فاکتور پیش‌نمایی A در عبارت نرخ واکنش آرنیوس می‌باشند. به‌منظور تشکیل ماتریس ضرایب

حساسیت از معادله (۱) مشتق‌گیری شده و فرم جدید آن به صورت معادله (۲) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial \phi}\frac{\partial \phi}{\partial \alpha}+\frac{\partial F}{\partial \alpha}=0 \quad (۲)$$

$\frac{\partial F}{\partial \phi}$ ماتریس ژاکوبین معادلات حاکم بر واکنشگاه و $\frac{\partial F}{\partial \alpha}$ ماتریس مشتق‌های جزئی نسبت به متغیرهای واکنشگاه است. ستون‌های ماتریس تشکیل شده بیانگر وابستگی بردار F به هر پارامتر می‌باشند. $\frac{\partial \phi}{\partial \alpha}$ماتریس ضرایب حساسیت می‌باشد که در آن تأثیر پارامترهای مختلف هم‌چون دما و کسر گونه‌ها بر روی مسئله سنجیده می‌شود. محاسبه ضرایب حساسیت با توجه به محاسبه مشتق‌های جزئی مشابه با محاسبه ژاکوبین از روش نیوتون اصلاح شده و همچنین براساس نرخ واکنش‌های مختلف موجود در سینتیک GRI۳/۰ انجام می‌شود.

۴- ۱- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته

به منظور بررسی استقلال نتایج در شبیه‌سازی کوره احتراق بدون شعله از سه شبکه ساختار یافته با تعداد سلول‌های محاسباتی ۲۰۱۰۰، ۴۰۱۰۰ و ۷۶۸۰۰ استفاده شده است. به منظور بررسی استقلال از شبکه نتایج عددی از شاخص همگرایی شبکه در نظر گرفته شده توسط ریچاردسون [۱۸] و توسعه داده شده توسط بلیگا [۱۹] منطبق با رابطه (۳) استفاده شده است.

$$GCI = F_s \frac{\varepsilon}{r^p - 1} \quad (۳)$$

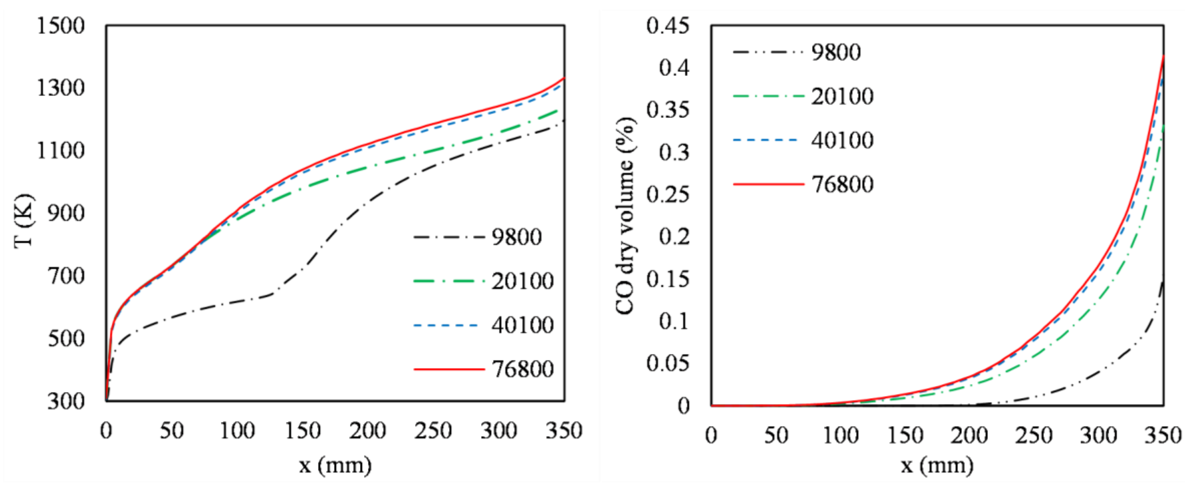
در رابطه (۳)، F_s عددی ثابت بوده که با توجه به مطالعات مختلف [۱۸ و ۲۰] برابر با ۱/۲۵ در نظر گرفته شده است. همچنین p و ε به ترتیب بیانگر مرتبه همگرایی و خطای نسبی دو شبکه در شبیه‌سازی‌ها می‌باشند. برای محاسبه GCI مقادیر p و ε به ترتیب از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند.

$$p = ln\left|\frac{(f_{coarse} - f_{medium})/(f_{medium} - f_{fine})}{\ln r}\right| \quad (۴)$$

$$\varepsilon = \frac{\left|f_{coarse} - f_{fine}\right|}{f_{fine}} \quad (۵)$$

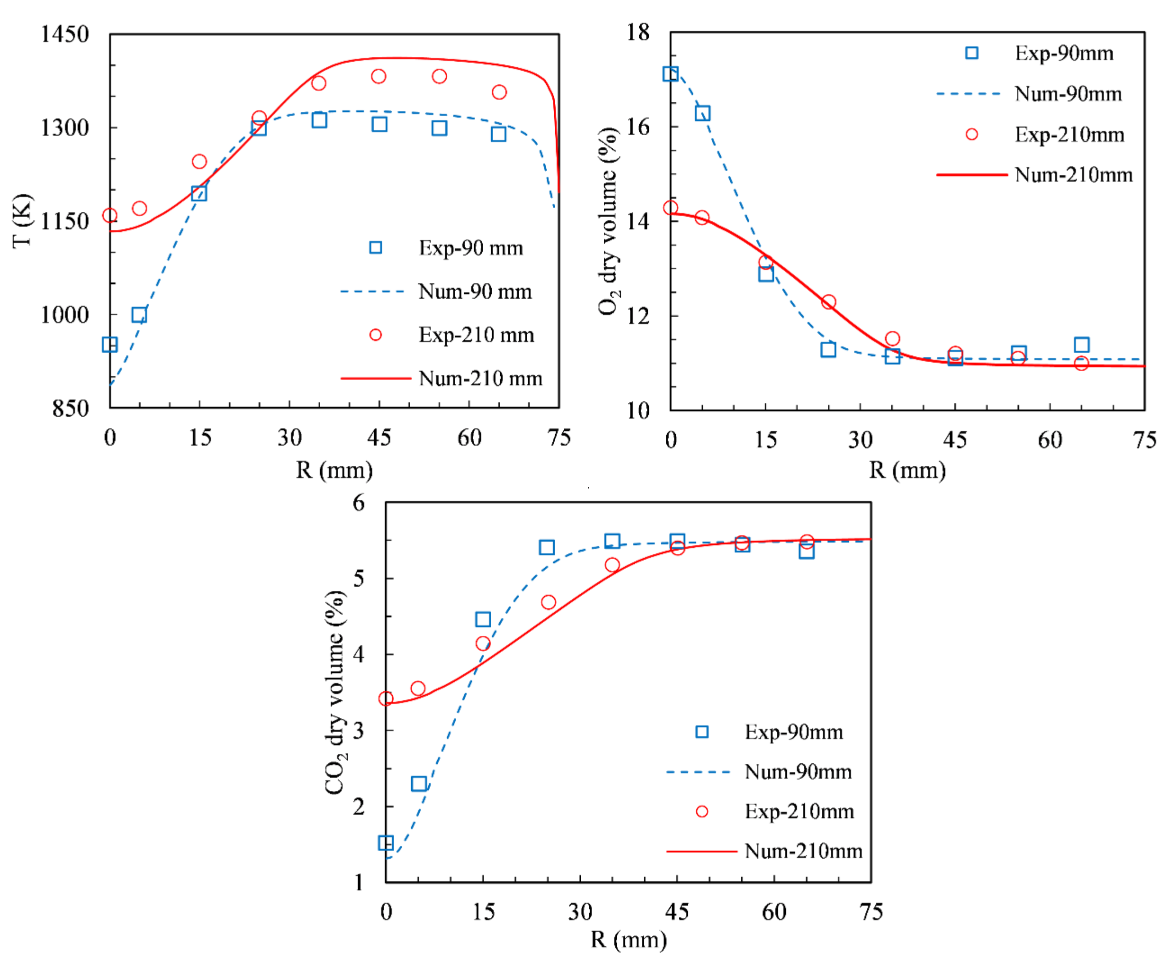
در روابط بالا f_{coarse}، f_{medium} و f_{fine} به ترتیب بیانگر حل‌های عددی صورت گرفته برای شبکه‌های درشت، متوسط و ریز می‌باشد. مقدار r نشان‌دهنده میزان ریز شدن شبکه محاسباتی می‌باشد که با توجه به اینکه در مطالعات گذشته [۱۸ و ۱۹] حداقل مقدار تعیین شده برای آن ۰/۳ می‌باشد، سه شبکه با تعداد سلول محاسباتی بیان شده، به کار گرفته شده است. با محاسبه مقدار GCI برای شبکه متوسط نسبت به درشت ($GCI_{۲۱}$) و شبکه ریز نسبت به شبکه متوسط ($GCI_{۳۲}$) مقادیر شاخص همگرایی شبکه براساس محاسبه انجام گرفته برمبنای سرعت متوسط جریان محاسبه شده‌اند. بر این مبنا مقادیر $GCI_{۲۱}$و $GCI_{۳۲}$به ترتیب برابر با ۶/۹۲ و ۰/۱۲ درصد می‌باشد که بیانگر خطای پایین شبکه متوسط نسبت به شبکه درشت و در نتیجه مستقل بودن نتایج با دقت بسیار خوب برای شبکه با ۴۰۱۰۰ سلول محاسباتی می‌باشد. علاوه‌بر این نتایج مربوط به تغییرات دما و کسر حجمی خشک مونوکسید کربن بر روی خط مرکزی کوره در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات دما و کسر حجمی خشک CO برای شبکه با ۴۰۱۰۰ سلول محاسباتی منطبق بر روی یکدیگر بوده و استفاده از شبکه ساختار یافته با ۴۰۱۰۰ سلول محاسباتی می‌تواند بیانگر حل عددی مستقل از شبکه محاسباتی باشد.

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل عددی، تغییرات شعاعی دما و کسر حجمی خشک گونه‌های اکسیژن و دی‌اکسید کربن در فواصل محوری ۹۰ و ۲۱۰ میلی‌متری در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حلگر و مدل‌سازی‌های انجام شده تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی داشته و متوسط خطای حل عددی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های تجربی برای توزیع دما کمتر از ۵ درصد و برای کسر حجمی خشک گونه‌های اکسیژن و دی‌اکسید کربن به ترتیب کمتر از ۶ و ۸ درصد می‌باشد (مطابق با مطالعه تجربی انجام شده خطای اندازه‌گیری دما به وسیله ترموکوپل‌های مورد استفاده پس از اصلاح ۵٪ و خطای متوسط اندازه‌گیری گونه‌ها نیز به وسیله پروب‌های اندازه‌گیری کسر حجمی خشک گونه‌ها ۵٪ گزارش شده است [۱۳]).



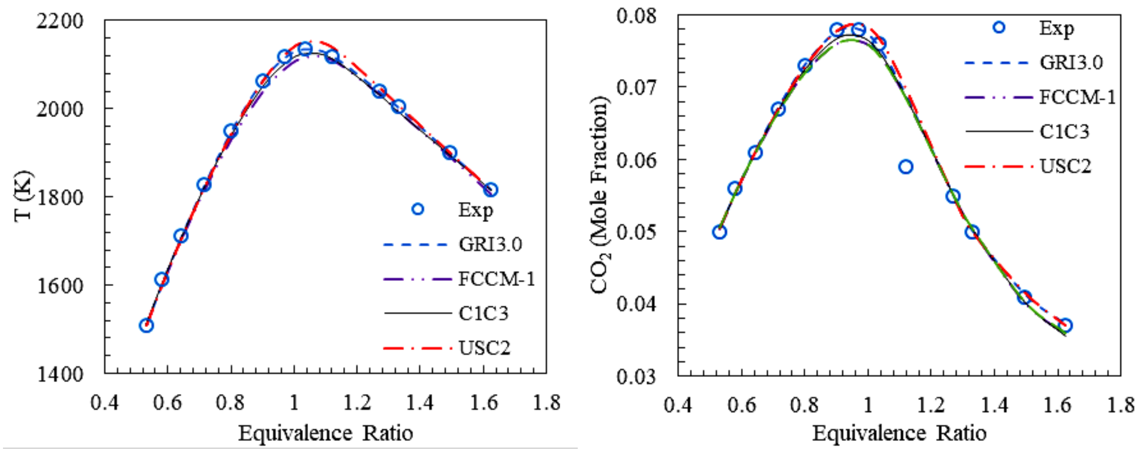
شکل ۲. تغییرات دما و کسر حجمی خشک CO بر روی خط مرکزی کوره برای شبکه با ۹۸۰۰، ۲۰۱۰۰، ۴۰۱۰۰ و ۷۶۸۰۰ سلول محاسباتی

Fig. 2. Variations of temperature and CO dry volume on the centerline of furnace for the mesh with 9800, 20100, 40100 and 76800 computational cells



شکل ۳. مقایسه تغییرات شعاعی بدست آمده از حل عددی برای دما، کسر حجمی خشک اکسیژن و دی‌اکسید کربن با نتایج حاصل از مطالعه تجربی در فواصل محوری ۹۰ و ۲۱۰ میلی‌متری از ابتدای کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته

Fig. 3. Comparison between variations of obtained numerical solutions for temperature, oxygen and carbon dioxide dry volume fraction with obtained results from experimental study at axial distances 90 and 210 mm from first of non-premixed combustion furnace



شکل ۴. مقایسه تغییرات دما و کسر مولی دی‌اکسید کربن محاسبه شده با استفاده از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل برحسب نسبت هم‌ارزی به کمک چهار سنتیک شیمیایی

GRI۳/۰، C۱C۳، FCCM−۱ و USC۲/۰

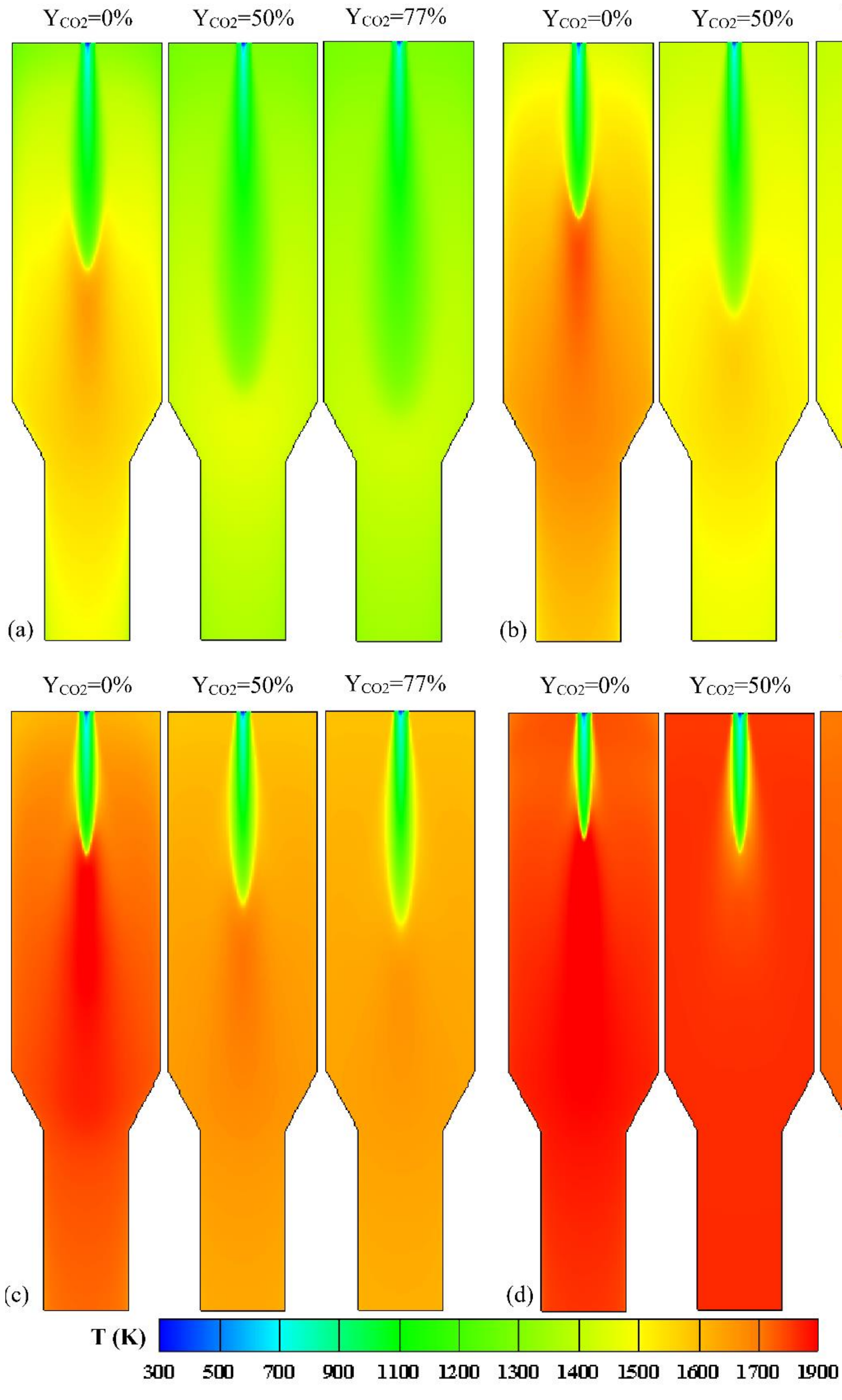
Fig. 4. Comparison of variations of calculated temperature and carbon dioxide mole fraction using well stirred reactor according to equivalence ratio with the help of four chemical kinetics GRI3.0, C1C3, FCCM-1 and USC2.0

۴- ۲- اعتبارسنجی حلگر و سنتیک شیمیایی در محاسبات سنتیکی به وسیله واکنشگاه اختلاط ایده‌آل

همان طور که پیش از این بیان شد به منظور تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، از محاسبات سینتیکی با استفاده از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل استفاده می‌شود. در محاسبات سینتیکی علاوه‌بر حلگر، سینتیک شیمیایی مورد استفاده نقشی اساسی در دقت نتایج ایفا می‌کند. از این‌رو در این قسمت به اعتبار سنجی حل واکنشگاه اختلاط ایده‌آل با استفاده از چهار سینتیک شیمیایی GRI۳/۰ با ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش شیمیایی [۱۷]، USC۲/۰ با ۱۱۱ گونه و ۷۸۴ واکنش شیمیایی [۲۱]، سینتیک C۱C۳ توسعه داده شده توسط رنزی و همکاران [۲۲] با ۱۱۴ گونه و ۱۹۹۹ واکنش شیمیایی و همچنین سینتیک شیمیایی FCCM−۱ با ۳۸ گونه و ۲۹۱ واکنش شیمیایی [۲۳] پرداخته شده است. از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل زابارنیک و زلینا [۲۴] جهت اعتبارسنجی‌ها استفاده شده است. در مطالعه تجربی ایشان، از واکنشگاهی با حجم ۶۷/۴ سانتی‌متر مکعب استفاده شده است که متان و هوای کاملاً مخلوط در دمای ۳۰۰ کلوین به درون آن وارد می‌شوند. مخلوط احتراقی تحت فشار اتمسفر و در زمان ماند ۰/۰۰۸۶ ثانیه محترق می‌شود. اتلاف حرارتی از دیواره واکنشگاه برابر با ۱۰ cal/s می‌باشد که در محاسبات سینتیکی جهت اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نتایج حاصل از محاسبات سینتیکی با استفاده از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل برای تغییرات دما و کسر مولی دی‌اکسید کربن را برحسب نسبت هم‌ارزی با استفاده از سینتیک‌های بیان شده در مقایسه با داده‌های تجربی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، سینتیک‌های شیمیایی مورد استفاده تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی داشته و تنها در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک به استوکیومتری با یکدیگر اختلاف دارند. با توجه به نتایج بدست آمده، سینتیک GRI۳/۰ کمینه خطا را در مقایسه با سایر سینتیک‌ها داشته و از آن برای تحلیل شیمیایی نتایج استفاده شده است (در محاسبات سینتیکی مربوط به واکنشگاه اختلاط ایده‌آل تحت رژیم بدون شعله زمان ماند محصولات احتراق مطابق با مرجع [۳] یک ثانیه در نظر گرفته شده است).

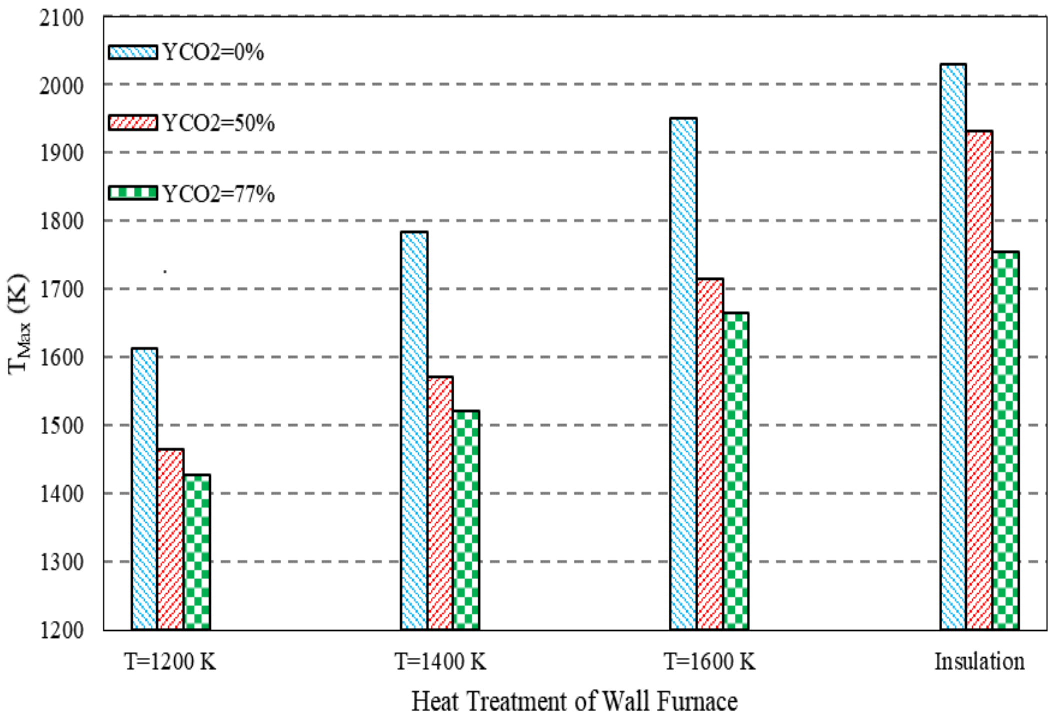
۴- ۳- تأثیر شرایط حرارتی دیواره و ساختار اکسنده بر شرایط دمایی و رژیم احتراقی

در این قسمت تأثیر شرایط حرارتی دیواره و ساختار اکسنده بر شرایط دمایی داخل کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته و میزان انتشار ناکس مطالعه شده است. شکل ۵ نشان دهنده کانتور دمای کوره تحت استفاده از ساختارهای اکسنده مختلف و شرایط حرارتی متفاوت دیواره کوره است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای دیواره کوره از ۱۲۰۰ کلوین به سمت شرایط دیواره با عایق حرارتی، از میزان اتلاف حرارتی به صورت قابل توجهی کاسته شده که این موضوع منجر به افزایش دمای گازهای داخل کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته خواهد شد. افزایش دمای بیان شده به گونه‌ای است



شکل ۵. کانتور تغییرات دما برای مقادیر کسر جرمی CO_2 برابر با ۰، ۵۰ و ۷۷ درصدی در سمت اکسنده و تحت شرایط حرارتی مختلف شامل a) دمای دیواره ۱۲۰۰ کلوین b)، دمای دیواره ۱۴۰۰ کلوین c)، دمای دیواره ۱۶۰۰ کلوین و d) دیواره با عایق حرارتی

Fig. 5. Contours of temperature variations for mass fraction values of CO2 equal to 0, 50 and 77 percentage in side of oxidant under the different thermal conditions contain a) wall temperature 1200 K, b) wall temperature 1400 K, c) wall temperature 1600 K and d) wall with insulation



شکل ۶. مقایسه دمای بیشینه گازهای حاصل از احتراق در شرایط حرارتی متفاوت در نظر گرفته شده برای دیواره کوره و تحت تزریق مقادیر ۰، ۵۰ و ۷۷ درصدی دی‌اکسید کربن درون ساختار اکسنده

Fig. 6. Comparison of maximum temperature of combustion product gases at different considered thermal condition for furnace wall and under the injection of 0, 50 and 77 percentage of carbon dioxide in the oxidant structure

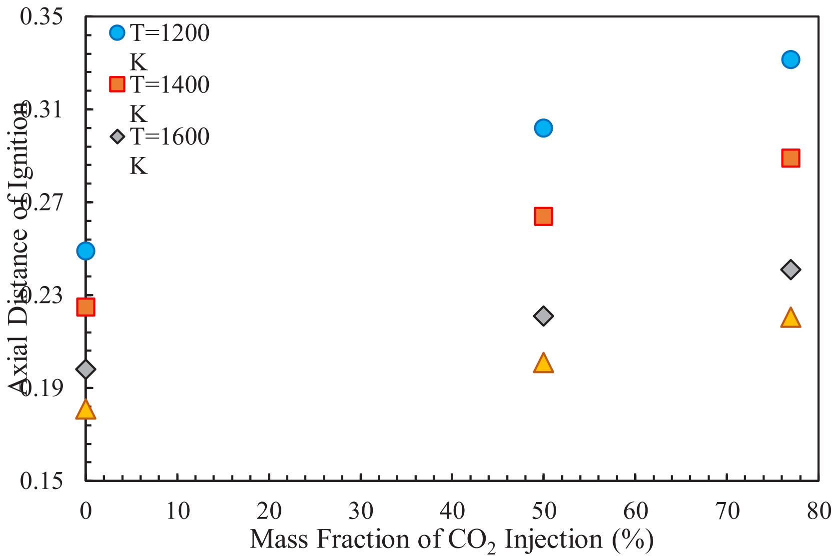
که مطابق با شکل ۶ منجر به افزایش بیشینه دمای فرآیند احتراق از ۱۶۱۳ کلوین تحت شرایط دمای دیواره ۱۲۰۰ کلوین به ۲۰۳۰ کلوین تحت شرایط استفاده از عایق حرارتی به عنوان شرط مرزی دیواره کوره می‌شود. از طرفی استفاده از مقادیر مختلف دی‌اکسید کربن درون ساختار اکسنده و جایگزینی آن با نیتروژن منجر به کاهش دمای بیشینه فرآیند احتراق و یکنواخت‌تر شدن توزیع دمایی داخل کوره می‌شود که این موضوع در تمامی شرایط حرارتی در نظر گرفته شده برای دیواره کوره صادق می‌باشد. دلیل کاهش دمای بیشینه فرآیند احتراق و افزایش یکنواختی توزیع دمای داخل محفظه، تفاوت خواص فیزیکی و شیمیایی دی‌اکسید کربن با نیتروژن می‌باشد. در میان خواص فیزیکی، ظرفیت حرارتی بسیار بالاتر دی‌اکسید کربن نسبت به نیتروژن نقش ویژه‌ای داشته در حالی که از نظر شیمیایی حضور فعال‌تر CO_2 در واکنش‌های گرماگیر نسبت به N_2 که به میزان بسیار ناچیزی در واکنش‌های شیمیایی مشارکت دارد، تأثیر به سزایی بر روی شرایط حرارتی حاصل شده دارد (نتایج بدست آمده با نتایج مطالعات پیشین روی مقایسه میان شرایط حرارتی درون محفظه احتراق با جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن درون اکسنده مطابقت دارند [۱۶ و ۲۵ و ۲۶]).

شرایط حرارتی حاکم بر دیواره کوره و ساختار اکسنده می‌تواند بر روی رژیم احتراقی نقش قابل توجهی ایفا کند. با توجه به شرایط ورودی‌های سوخت و هوا و همچنین طراحی هندسی صورت گرفته، امکان تشکیل رژیم‌های احتراق دما بالا، بدون شعله و ناحیه گذر بین این دو رژیم در کوره حاضر امکان‌پذیر است. برای دسته‌بندی رژیم احتراقی تحت شرایط عملکردی مختلف، معیار دی‌جوانون و کاوالیر [۳ و ۲۷] که در مطالعات مختلف جهت شناسایی رژیم‌های مختلف احتراقی استفاده شده، به کار گرفته شده است. مطابق با این معیار رژیم‌های مختلف احتراقی با توجه به دمای مخلوط احتراقی پیش از وقوع واکنش‌های شیمیایی و دمای بیشینه فرآیند احتراق مطابق با جدول ۳ دسته‌بندی می‌شوند (در این جدول T_i بیانگر دمای ورودی اکسنده به درون محفظه احتراق، T_{ai} بیانگر دمای خوداشتعالی سوخت تحت شرایط عملکردی و $\Delta T=T_{max}-T_i$ نشان‌دهنده اختلاف میان دمای بیشینه احتراق و دمای ورودی اکسنده به درون محفظه احتراق می‌باشد). با توجه به معیارهای بیان شده در این جدول می‌توان مشاهده کرد که افزایش دمای دیواره کوره تا انتقال به شرایط عایق حرارتی برای دیواره محفظه احتراق منجر به انتقال از رژیم احتراقی بدون شعله به ناحیه

جدول ۳. معیار دسته‌بندی رژیم‌های مختلف احتراقی با توجه به دمای ورودی و اختلاف میان بیشینه دمای فرآیند احتراق با دمای اکسنده

Table 3. Criteria of different combustion regimes category due to the inlet temperature and difference between maximum temperatures of combustion process with oxidant temperature

رژیم احتراقی	شرایط حاکم بر رژیم احتراقی
بدون احتراق	$\Delta T < T_{in} < T_{ai}$
احتراق معمولی	$T_{in} < T_{ai} < \Delta T$
احتراق دما بالا	$T_{ai} < T_{in}$ و $T_{ai} < \Delta T$
احتراق بدون شعله	$\Delta T < T_{ai} < T_{in}$



شکل ۷. تغییرات فاصله محوری آغاز فرآیند اشتعال برحسب مقادیر مختلف کسر جرمی دی‌اکسید کربن درون اکسنده تحت شرایط حرارتی مختلف برای دیواره کوره

Fig. 7. Variations of axial distance of ignition process initiation according to different values of carbon dioxide mass fractions in oxidant under different thermal condition for furnace wall

احتراقی دما بالا می‌شود. عامل اصلی تغییر رژیم احتراقی با تغییر دمای دیواره کوره، آغاز سریع‌تر فرآیند احتراق و کاهش قابل توجه زمان تأخیر در اشتعال می‌باشد که این موضوع با توجه به شکل ۷ که نشان‌دهنده فاصله محوری رسیدن مقدار کسر جرمی رادیکال فرمالدهید به ۷۵ درصد مقدار بیشینه آن می‌باشد، قابل مشاهده است (معیارهای مختلفی جهت محاسبه تأخیر در اشتعال در مراجع مختلف [۳۰-۲۸] مورد توجه قرار گرفته است که یکی از رایج‌ترین آن‌ها تعیین تأخیر در اشتعال براساس تغییرات رادیکال فرمالدهید می‌باشد که در مطالعه حاضر نیز از این معیار جهت تفسیر نتایج استفاده شده است). همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، افزایش دمای دیواره کوره منجر به آغاز فرآیند احتراق در فاصله محوری بسیار کمتری نسبت به کوره با دمای دیواره پایین‌تر می‌شود به گونه‌ای که این فاصله برای شرایط احتراقی با اکسنده هوا در شرایط دمای دیواره ۱۲۰۰ کلوین، ۰/۲۴۹ می‌باشد، در حالی که تحت شرایط عایق حرارتی دیواره این فاصله به ۰/۱۸۱ کاهش می‌یابد. وقوع واکنش‌های شیمیایی در فاصله محوری کوتاه‌تر سبب می‌شود تا نرخ رقیق‌سازی و پیش‌گرمایش مخلوط احتراقی با استفاده از بازچرخش محصولات احتراق کاهش پیدا کرده و منجر می‌شود تا شرایط تشکیل احتراق بدون شعله فراهم گردد. در این حالت با افزایش دمای دیواره کوره در یک ساختار اکسنده مشابه، احتراق دما بالا ایجاد می‌شود (شروط اساسی و لازم جهت تشکیل احتراق بدون شعله رقیق‌سازی اکسنده و پیش‌گرمایش آن به بیش از دمای خوداشتعالی پیش از انجام واکنش‌های شیمیایی می‌باشد [۳۱]).

جدول ۴. واکنش‌ها و شماره واکنش‌های مربوط به آنالیز حساسیت رادیکال فرمالدهید

Table 4. Reactions and reaction numbers related to sensitivity analyses of formaldehyde radical

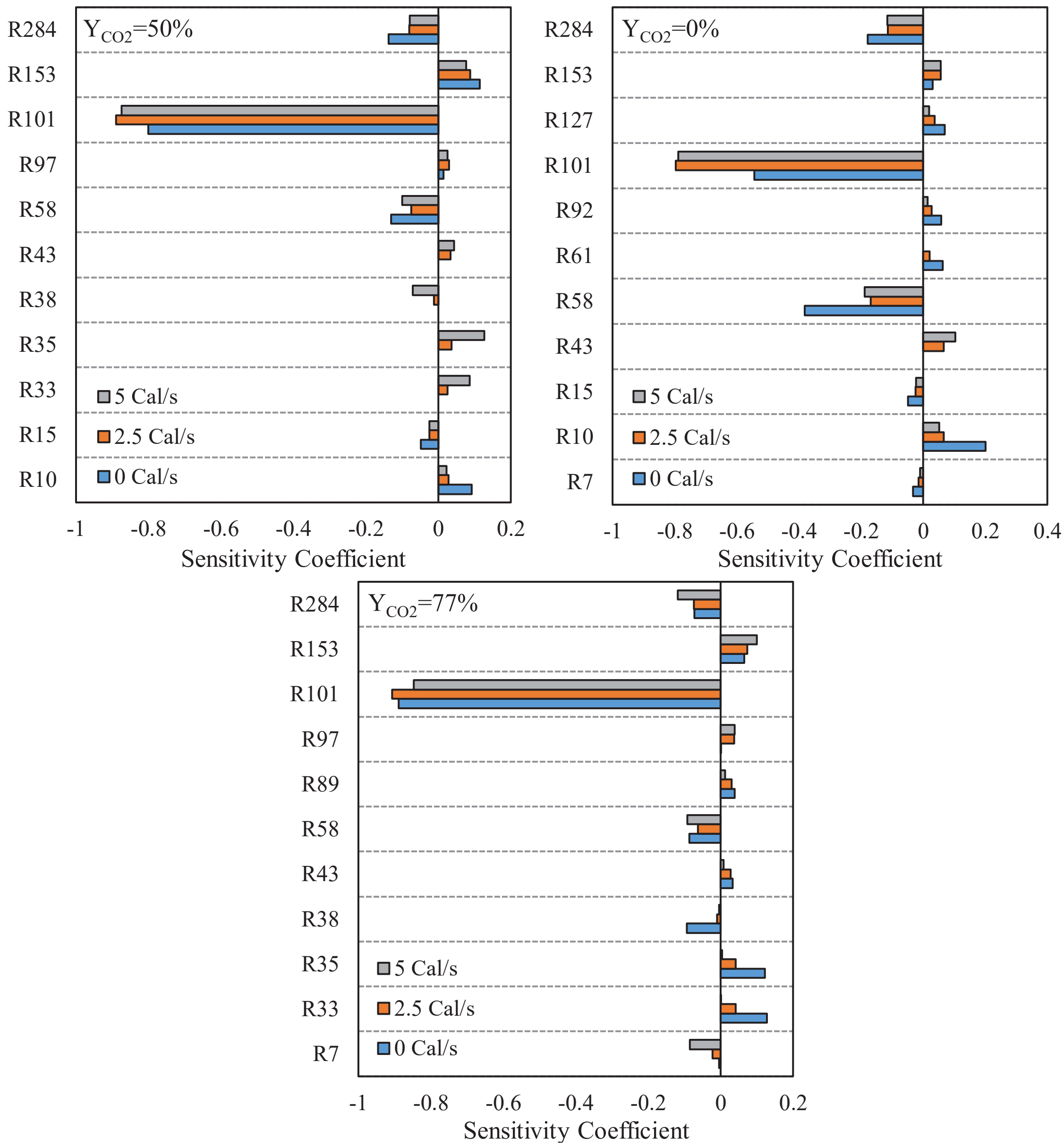
شماره واکنش	واکنش	شماره واکنش	واکنش
R۷	$O+CH_2 \rightleftharpoons H+HCO$	R۶۱	$H+CH_2OH \rightleftharpoons OH+CH_3$
R۱۰	$O+CH_3 \rightleftharpoons H+CH_2O$	R۸۹	$OH+H_2O_2 \rightleftharpoons HO_2+H_2O$
R۱۵	$O+CH_2O \rightleftharpoons OH+HCO$	R۹۲	$OH+CH_2 \rightleftharpoons H+CH_2O$
R۳۳	$H+O_2+M \rightleftharpoons HO_2+M$	R۹۷	$OH+CH_3 \rightleftharpoons CH_2(s)+H_2O$
R۳۵	$H+O_2+H_2O \rightleftharpoons HO_2+H_2O$	R۱۰۱	$OH+CH_2O \rightleftharpoons HCO+H_2O$
R۳۸	$H+O_2 \rightleftharpoons O+OH$	R۱۲۷	$CH+H_2O \rightleftharpoons H+CH_2O$
R۴۳	$H+OH+M \rightleftharpoons H_2O+M$	R۱۵۳	$CH_2(s)+CO_2 \rightleftharpoons CO+CH_2O$
R۵۸	$H+CH_2O \rightleftharpoons HCO+H_2$	R۲۸۴	$O+CH_3 \rightleftharpoons H+H_2+CO$

مشابه با شرایط حرارتی دیواره، ساختار اکسنده نیز تأثیر قابل توجهی روی رژیم احتراقی دارد که این موضوع به علت تفاوت‌های فیزیکی و شیمیایی میان دی‌اکسید کربن و نیتروژن می‌باشد. جایگزینی $CO_۲$ با $N_۲$ درون اکسنده منجر به افزایش تأخیر در اشتعال می‌گردد. ظرفیت حرارتی بالاتر دی‌اکسید کربن نسبت به نیتروژن عامل فیزیکی اصلی در افزایش تأخیر در اشتعال می‌باشد در حالی که آنالیز حساسیت واکنش‌های شیمیایی (مطابق با شکل ۸) نشان دهنده آن است که واکنش‌های $HCO+H_۲ \rightleftharpoons H+CH_۲O$، $OH+CH_۲O \rightleftharpoons HCO+H_۲O$ و $CH_۲(s)+CO_۲ \rightleftharpoons CO+CH_۲O$ و $O+CH_۳ \rightleftharpoons H+H_۲+CO$ مهم‌ترین نقش را روی تأخیر در آغاز فرآیند اشتعال در اثر جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن ایفا می‌کنند (جدول ۴ بیانگر واکنش‌های ارائه شده در آنالیز حساسیت شکل ۸ می‌باشند. شماره واکنش‌های ارائه شده در جدول ۴ و شکل ۸ متناسب با شماره واکنش‌های سینتیک شیمیایی GRI۳/۰ می‌باشد). افزایش تأخیر در اشتعال سبب می‌شود تا با توجه به هندسه کوره، بازچرخش شدیدتری از محصولات احتراقی به درون واکنش‌دهنده‌ها پیش از وقوع فرآیند احتراق ایجاد شود و شرایط جهت تشکیل رژیم احتراقی بدون شعله فراهم گردد. بدین ترتیب تغییر ساختار اکسنده از نیتروژن به دی‌اکسید کربن منجر به تسهیل در تشکیل احتراق بدون شعله می‌شود که این موضوع در تضاد با افزایش دمای دیواره کوره به منظور تعیین رژیم احتراقی است.

در جدول ۵، رژیم‌های مختلف احتراقی تحت شرایط مختلف حرارتی در نظر گرفته شده برای دیواره کوره و ساختار اکسنده با توجه به معیار معرفی شده توسط دی‌جوانون و همکاران [۲۷ و ۳۲ و ۳۳] (ارائه شده در جدول ۳) بیان شده است که مطابق با توضیحات ارائه شده افزایش دمای دیواره کوره منجر به انتقال از شرایط احتراق بدون شعله به احتراق معمولی می‌شود در حالی که جایگزینی $CO_۲$ با $N_۲$ منجر به تسهیل در تشکیل رژیم احتراقی بدون شعله می‌گردد.

۴- ۴- تأثیر شرایط حرارتی دیواره و ساختار اکسنده بر انتشار آلاینده ناکس

شکل ۹ نشان دهنده تأثیر شرایط حرارتی حاکم بر دیواره کوره (دیواره عایق و دیواره با دمای ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۶۰۰ کلوین) و ساختار اکسنده (استفاده از کسر جرمی ۰، ۵۰ و ۷۷ درصدی دی‌اکسید کربن درون اکسنده) بر انتشار آلاینده ناکس از کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته است (در شرایط استفاده از کسر جرمی ۷۷ درصدی دی‌اکسید کربن از یک درصد کسر جرمی نیتروژن مشابه با مطالعات پیشین در ارتباط با احتراق سوخت- اکسیژن به منظور مطالعه ناکس منتشر شده از آن استفاده شده است [۱۶ و ۲۶]). مطابق با نتایج بدست آمده، افزایش دمای دیواره کوره منجر به انتشار قابل توجه آلاینده ناکس شده به گونه‌ای که افزایش مقدار ناکس منتشر شده تحت استفاده از هوا به عنوان اکسنده از ۱/۲ ppm در دمای دیواره ۱۲۰۰ کلوین به ۳۷/۷ ppm در شرایط دیواره با عایق حرارتی مشاهده می‌شود. تغییر شرایط حرارتی داخل کوره و به تبع آن شرایط واکنش‌های احتراقی درون آن عامل اصلی در افزایش قابل توجه میزان ناکس منتشر شده با افزایش دمای دیواره می‌باشد. با توجه به مقادیر بدست آمده در هر سه حالت احتراق سوخت- هوا، اکسیژن غنی و سوخت- اکسیژن با انتقال از رژیم احتراق بدون



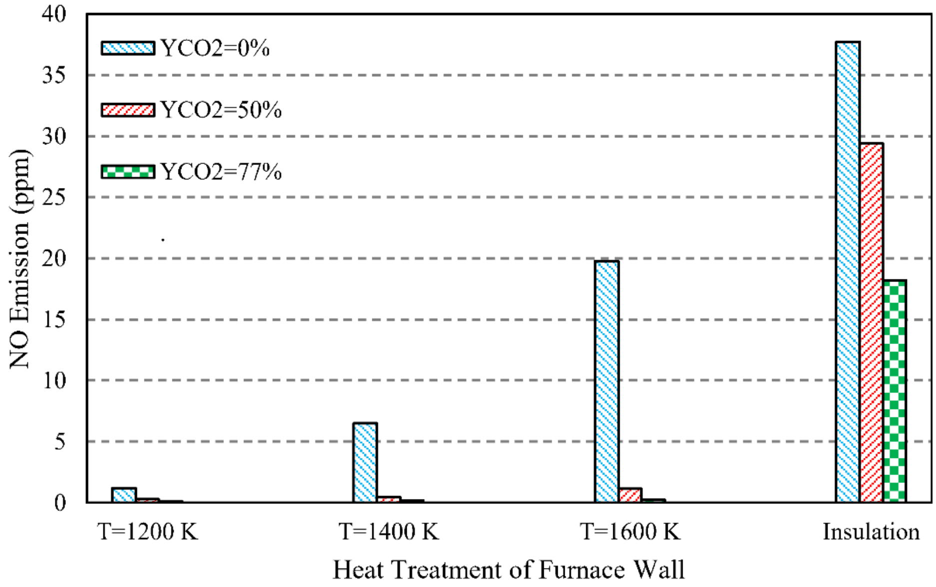
شکل ۸. آنالیز حساسیت واکنش‌های شیمیایی مربوط به گونه فرمالدهید در شرایط حرارتی مختلف واکنشگاه تحت شرایط تزریق مقادیر مختلف دی‌اکسید کربن درون اکسنده

Fig. 8. Sensitivity analysis of chemical reactions related to formaldehyde species at different thermal condition of reactor under the different values of carbon dioxide injection in oxidant

جدول ۵. رژیم‌های مختلف احتراقی تحت شرایط حرارتی دیواره و ساختارهای اکسنده متفاوت (شرایط حرارتی دیواره و ساختار اکسنده در هر ردیف از جدول ۱ قابل مشاهده است)

Table 5. Different combustion regimes under the different thermal condition of wall and oxidant structure (wall thermal condition and oxidant structure is visible at the each columns of Table 1)

ردیف	رژیم احتراقی	ردیف	رژیم احتراقی	ردیف	رژیم احتراقی
۱	بدون شعله	۵	بدون شعله	۹	بدون شعله
۲	بدون شعله	۶	بدون شعله	۱۰	دما بالا
۳	بدون شعله	۷	دما بالا	۱۱	دما بالا
۴	بدون شعله	۸	دما بالا	۱۲	دما بالا



شکل ۹. مقادیر انتشار آلاینده ناکس تحت تزریق ۰، ۵۰ و ۷۷ درصد کسر جرمی دی‌اکسید کربن درون اکسنده با در نظر گرفتن شرایط حرارتی مختلف برای دیواره کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته

Fig. 9. Values of NOx pollutant emission under the injection of 0, 50 and 77 percent of carbon dioxide mass fraction in oxidant by considering different thermal conditions for the wall of non-premixed combustion furnace

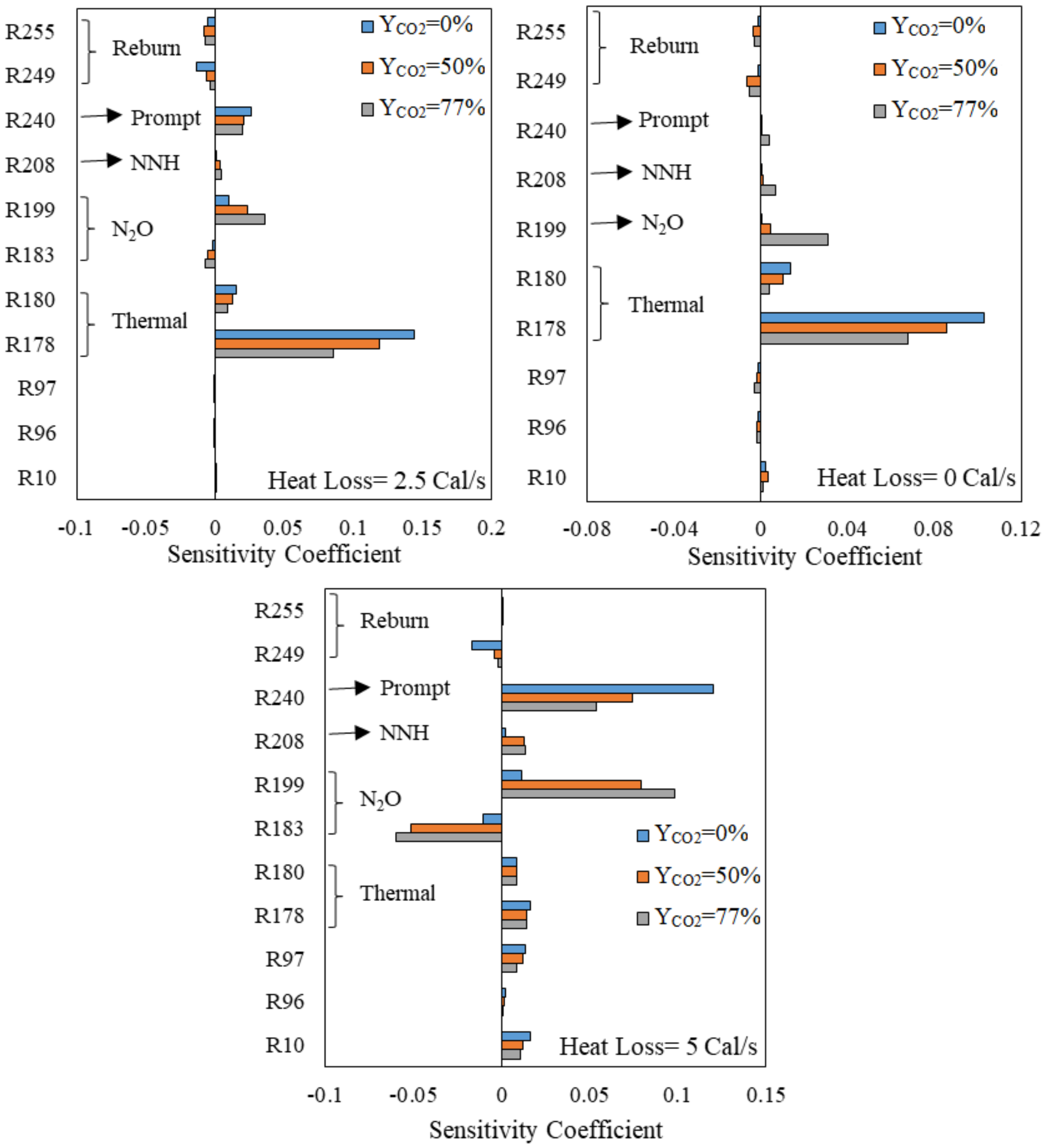
جدول ۶. شماره واکنش‌ها و واکنش‌های مربوط به تحلیل سینتیکی انتشار ناکس

Table 6. Reactions number and the reaction related to sensitivity analysis of NOx emission

شماره واکنش	واکنش	شماره واکنش	واکنش
R۱۰	$O+CH_3 \rightleftharpoons H+CH_2O$	R۱۹۹	$NH+NO \rightleftharpoons N_2O+H$
R۹۶	$OH+CH_3 \rightleftharpoons CH_2+H_2O$	R۲۰۸	$NNH+O \rightleftharpoons NH+NO$
R۹۷	$OH+CH_3 \rightleftharpoons CH_2(s)+H_2O$	R۲۴۰	$CH+N_2 \rightleftharpoons HCN+N$
R۱۷۸	$N+NO \rightleftharpoons N_2+O$	R۲۴۹	$CH_2+NO \rightleftharpoons H+HNCO$
R۱۸۰	$N+OH \rightleftharpoons NO+H$	R۲۵۵	$CH_3+NO \rightleftharpoons HCN+H_2O$
R۱۸۳	$N_2O+H \rightleftharpoons N_2+OH$		

شعله به ناحیه احتراقی دما بالا، میزان ناکس تولید شده از فرآیند احتراق به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. در رژیم احتراق دما بالا شرایط به گونه‌ای است که با افزایش دمای دیواره کوره و در نتیجه کاهش تلفات حرارتی، ناکس منتشر شده به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد؛ در رژیم بدون شعله با وجود افزایش ناکس تولیدی با افزایش دمای دیواره، سطح انتشار این آلاینده بسیار ناچیز می‌باشد (در این رژیم میزان ناکس تولیدی همواره کمتر از ۲ ppm است)؛ از این‌رو می‌توان گفت که استفاده از شرایط با اتلاف حرارتی کم تنها تحت شرایط رژیم بدون شعله از نظر انتشار آلاینده ناکس قابل قبول است.

در شکل ۱۰ به منظور بررسی بهتر تغییرات واکنشی در اثر تغییر در شرایط حرارتی دیواره کوره و ساختار اکسنده، آنالیز حساسیت مربوط به شرایط احتراقی سوخت- هوا با مقادیر مختلف اتلاف حرارتی با شرایط احتراق اکسیژن غنی و سوخت- اکسیژن مقایسه شده است (واکنش مربوط به هر شماره واکنش در جدول ۶ ارائه شده است). همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسنده منجر به کاهش سهم مکانیسم حرارتی (واکنش‌های $N_2+O \rightleftharpoons N+NO$ و $NO+H \rightleftharpoons N+OH$) در تولید ناکس شده که این موضوع در هر سه حالت افت حرارتی ۰ و ۲/۵ و ۵ کالری بر ثانیه اتفاق می‌افتد. علت اصلی



شکل ۱۰. آنالیز حساسیت واکنش‌های شیمیایی با مقادیر افت‌های حرارتی ۰، ۲/۵ و ۵ کالری بر ثانیه تحت تزریق مقادیر مختلف دی‌اکسید کربن درون اکسنده به منظور بررسی مکانیسم‌های مختلف انتشار ناکس

Fig. 10. Sensitivity analyses of chemical reaction with heat loss values 0, 2.5 and 5 cal/s under the different values of carbon dioxide injection in oxidant for the investigation of different mechanisms of NO_x emission

این موضوع کاهش دمای بیشینه فرآیند احتراق (به عنوان عامل اصلی در تولید ناکس از طریق مکانیسم حرارتی) با تزریق مقادیر بالاتر دی‌اکسید کربن درون اکسنده می‌باشد. ظرفیت حرارتی بالاتر دی‌اکسید کربن نسبت به نیتروژن و حضور $CO_۲$ در واکنش‌های گرماگیر دو عامل بسیار تعیین کننده در کاهش دمای بیشینه تحت شرایط استفاده از $CO_۲$ می‌باشند. در هر سه افت حرارتی بررسی شده سهم مکانیسم $N_۲O$ واسطه با انتقال به شرایط احتراقی اکسیژن غنی و سوخت- اکسیژن به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد (واکنش‌های ۱۸۳R و ۱۹۹R مربوط به این مکانیسم هستند).

در شکل ۱۰ حالت‌های با افت حرارتی ۰ و ۲/۵ کالری بر ثانیه مربوط به رژیم احتراق دما بالا (در حالت با افت حرارتی ۲/۵ کالری بر ثانیه، بیشینه دما نسبت به حالت بدون اتلاف حرارتی به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد) بوده و شرایط واکنشگاه اختلاط ایده‌آل با اتلاف حرارتی ۵ کالری بر ثانیه مربوط به شرایطی است که رژیم احتراقی بدون شعله تشکیل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با انتقال به رژیم احتراق بدون شعله به علت کاهش بیشینه دمای فرآیند احتراق، مکانیسم فوری به عنوان مکانیسم اصلی انتشار ناکس تحت شرایط سوخت- هوا عمل می‌کند در حالی که

تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسنده منجر به قالب شده مکانیسم N_2O واسطه در انتشار ناکس تحت این رژیم می‌شود. در رژیم احتراقی دما بالا مکانیسم حرارتی عامل اصلی انتشار ناکس است؛ در این رژیم کاهش بیشینه دمای فرآیند احتراق که در اتلاف حرارتی ۲/۵ کالری بر ثانیه قابل مشاهده است، منجر به برجسته‌تر شدن مکانیسم فوری در انتشار ناکس تحت شرایط احتراقی سوخت- هوا و مکانیسم N_2O واسطه در شرایط احتراقی اکسیژن غنی و سوخت- اکسیژن می‌شود.

۵- جمع‌بندی

در مطالعه حاضر به بررسی تأثیر شرایط حرارتی حاکم بر دیواره کوره غیرپیش‌آمیخته شامل دماهای دیواره مختلف (دمای دیواره ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۶۰۰ کلوین و شرایط دیواره با عایق حرارتی) و همچنین تأثیر ساختار اکسنده (تزریق مقادیر ۰، ۵۰ و ۷۷ درصد کسر جرمی CO_2 درون اکسنده) بر روی توزیع دما، انتشار ناکس و مکانیسم‌های آن پرداخته شده است. بدین منظور از شبیه‌سازی عددی کوره احتراق غیرپیش‌آمیخته دانشگاه لیسبون و محاسبات سینتیکی با استفاده از واکنشگاه اختلاط ایده‌آل استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم افزار متن باز اپن فوم و با به کارگیری مدل آشفتگی کی- اپسیلون استاندارد، مدل احتراقی مفهوم اتلاف گردابه اصلاح شده، مدل تشعشعی فاز گسسته همراه با محاسبه ضرایب جذب و گسیل با استفاده از مدل جمع وزنی گازهای خاکستری به کمک سینتیک شیمیایی GRI۳/۰ انجام شده است. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر عبارتند از:

الف- افزایش دمای دیواره کوره منجر به افزایش دمای بیشینه و کاهش تأخیر در زمان اشتعال در فرآیند احتراق می‌شود. این موضوع سبب می‌شود تا با افزایش دمای دیواره و حرکت به سمت دیواره تحت شرایط عایق حرارتی انتقال از رژیم احتراق بدون شعله به رژیم احتراق دما بالا مشاهده شود.

ب- جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن درون اکسنده منجر به افزایش محدوده احتراق بدون شعله می‌شود. در واقع با افزایش کسر جرمی CO_2 موجود درون اکسنده امکان دست‌یابی به رژیم احتراق بدون شعله در دماهای دیواره کوره بالاتر میسر می‌شود؛ عامل اصلی در این موضوع کاهش بیشینه دمای فرآیند احتراق به علت تفاوت‌های فیزیکی و شیمیایی CO_2 با N_2 و همچنین افزایش تأخیر در اشتعال تحت شرایط تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسنده می‌باشد.

ج- جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن درون اکسنده منجر به افزایش یکنواختی دما درون محفظه احتراق می‌شود.

د- در احتراق سوخت- هوای بدون شعله مکانیسم اصلی تولید ناکس، مکانیسم فوری می‌باشد در حالی که برای احتراق اکسیژن غنی و سوخت- اکسیژن بدون شعله مکانیسم اصلی انتشار ناکس N_2O واسطه می‌باشد.

و- تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسنده منجر به کاهش بیشینه دمای احتراق و تغییر در مسیرهای واکنشی شده که این عامل کاهش تأثیر مکانیسم حرارتی در رژیم احتراقی دما بالا و افزایش سهم مکانیسم‌های فوری و N_2O واسطه است.

منابع

[1] E. Ebrahimi Fordoei, K. Mazaheri, Effects of preheating temperature and dilution level of oxidizer, fuel composition and strain rate on NO emission characteristics in the syngas moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion, Fuel, 285 119118.

[2] C. Yin, J. Yan, Oxy-fuel combustion of pulverized fuels: Combustion fundamentals and modeling, Applied Energy, 162 (2016) 742-762.

[3] A. Cavaliere, M. de Joannon, Mild combustion, Progress in Energy and Combustion science, 30(4) (2004) 329-366.

[4] Z. Mansouri, T. Boushaki, Experimental and numerical investigation of turbulent isothermal and reacting flows in a non-premixed swirl burner, International Journal of Heat and Fluid Flow, 72 (2018) 200-213.

[5] S. Xu, Y. Tu, P. Huang, C. Luan, Z. Wang, B. Shi, H. Liu, Z. Liu, Effects of wall temperature on methane MILD combustion and heat transfer behaviors with non-preheated air, Applied Thermal Engineering, (2020) 115282.

[6] G. Szegö, B. Dally, G. Nathan, Scaling of NOx emissions from a laboratory-scale mild combustion furnace, Combustion and Flame, 154(1-2) (2008) 281-295.

[7] G. Szegö, B. Dally, G. Nathan, Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system, Combustion and Flame, 156(2) (2009) 429-438.

[8] M.H. Moghadasi, R. Riazi, S. Tabejamaat, A. Mardani, Effects of preheating and CO2 dilution on oxy-MILD

combustion of natural gas, Journal of Energy Resources Technology, 141(12) (2019).

[9] Y. He, C. Zou, Y. Song, J. Luo, H. Jia, W. Chen, J. Zheng, C. Zheng, Comparison of the characteristics and mechanism of CO formation in O2/N2, O2/CO2 and O2/H2O atmospheres, Energy, 141 (2017) 1429-1438.

[10] Y. Liu, C. Zou, J. Cheng, H. Jia, C. Zheng, Experimental and numerical study of the effect of CO2 on the ignition delay times of methane under different pressures and temperatures, Energy & Fuels, 32(10) (2018) 10999-11009.

[11] P. Glarborg, L.L. Bentzen, Chemical effects of a high CO2 concentration in oxy-fuel combustion of methane, Energy & Fuels, 22(1) (2008) 291-296.

[12] S. Wang, Z. Wang, Y. He, X. Han, Z. Sun, Y. Zhu, M. Costa, Laminar burning velocities of CH4/O2/N2 and oxygen-enriched CH4/O2/CO2 flames at elevated pressures measured using the heat flux method, Fuel, 259 (2020) 116152.

[13] A. Rebola, M. Costa, P.J. Coelho, Experimental evaluation of the performance of a flameless combustor, Applied thermal engineering, 50(1) (2013) 805-815.

[14] A. Rebola, P. Coelho, M. Costa, Assessment of the performance of several turbulence and combustion models in the numerical simulation of a flameless combustor, Combustion Science and Technology, 185(4) (2013) 600-626.

[15] E. Ebrahimi Fordoei, K. Mazaheri, Numerical study of the effect of carbon dioxide injection on flame structure in flameless combustion regime, Fuel and Combustion, 13(3) (2020) 1-26 (in Persian).

[16] E. Ebrahimi Fordoei, K. Mazaheri, A. Mohammadpour, Numerical study on the heat transfer characteristics, flame structure, and pollutants emission in the MILD methane-air, oxygen-enriched and oxy-methane combustion, Energy, 218 119524.

[17] G.P. Smith, D.M. Golden, M. Frenklach, N.W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R.K. Hanson, S. Song, W.C. Gardiner Jr, GRI 3.0 Mechanism, Gas Research Institute (http://www. me. berkeley. edu/gri_mech), (1999).

[18] M. Lee, G. Park, C. Park, C. Kim, Improvement of Grid Independence Test for Computational Fluid Dynamics Model of Building Based on Grid Resolution, Advances in Civil Engineering, 2020 (2020).

[19] B.R.R. Baliga, I.Y. Lokhmanets, Generalized Richardson extrapolation procedures for estimating grid-independent numerical solutions, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, (2016).

[20] I.B. Celik, U. Ghia, P.J. Roache, C.J. Freitas, Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications, Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME, 130(7) (2008).

[21] H. Wang, X. You, A.V. Joshi, S.G. Davis, A. Laskin, F. Egolfopoulos, C.K. Law, U.M. Version II, High-temperature combustion reaction model of H2, CO/C1-C4 Compounds. http://ignis. usc. edu/USC_Mech_II. htm, 2007.

[22] E. Ranzi, C. Cavallotti, A. Cuoci, A. Frassoldati, M. Pelucchi, T. Faravelli, New reaction classes in the kinetic modeling of low temperature oxidation of n-alkanes, Combustion and flame, 162(5) (2015) 1679-1691.

[23] G. Smith, Y. Tao, H. Wang, Foundational fuel chemistry model version 1.0 (FFCM-1), epub, accessed July, 26 (2016) 2018.

[24] S. Zabarnick, J. Zelina, Chemical kinetics of NOx production in a well stirred reactor, in: Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1994, pp. 3828.

[25] Y. Tu, M. Xu, D. Zhou, Q. Wang, W. Yang, H. Liu, CFD and kinetic modelling study of methane MILD combustion in O2/N2, O2/CO2 and O2/H2O atmospheres, Applied Energy, 240 (2019) 1003-1013.

[26] Y. Tu, H. Liu, W. Yang, Flame characteristics of CH4/H2 on a jet-in-hot-coflow burner diluted by N2, CO2, and H2O, Energy & Fuels, 31(3) (2017) 3270-3280.

[27] M. De Joannon, G. Sorrentino, A. Cavaliere, MILD combustion in diffusion-controlled regimes of hot diluted fuel, Combustion and Flame, 159(5) (2012) 1832-1839.

[28] N. Donohoe, A. Heufer, W.K. Metcalfe, H.J. Curran, M.L. Davis, O. Mathieu, D. Plichta, A. Morones, E.L. Petersen, F. Güthe, Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures, Combustion and Flame, 161(6) (2014) 1432-1443.

[29] P.R. Medwell, P.A. Kalt, B.B. Dally, Simultaneous imaging of OH, formaldehyde, and temperature of turbulent nonpremixed jet flames in a heated and diluted coflow, Combustion and Flame, 148(1-2) (2007) 48-61.

[30] A. Parente, C. Galletti, L. Tognotti, Effect of the combustion model and kinetic mechanism on the MILD combustion in an industrial burner fed with hydrogen enriched fuels, International journal of hydrogen energy, 33(24) (2008) 7553-7564.

[31] P. Li, J. Mi, B. Dally, F. Wang, L. Wang, Z. Liu, S. Chen, C. Zheng, Progress and recent trend in MILD combustion, Science China Technological Sciences, 54(2) (2011) 255-269.

[32] M. De Joannon, P. Sabia, G. Cozzolino, G. Sorrentino, A. Cavaliere, Pyrolitic and oxidative structures in hot oxidant diluted oxidant (HODO) MILD combustion, Combustion science and technology, 184(7-8) (2012) 1207-1218.

[33] J. Zhang, J. Mi, P. Li, F. Wang, B.B. Dally, Moderate or intense low-oxygen dilution combustion of methane diluted by CO2 and N2, Energy & Fuels, 29(7) (2015) 4576-4585.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Tajdani, S. A. Hashemi , E. Ebrahimi Fordoei , Study of The Effect of Wall Temperature and Oxidant Structure on Temperature Distribution and NO Emission in Non-Premixed Combustion Furnace, Amirkabir J. Mech Eng., 54(1) (2022) 249-266.

DOI: 10.22060/mej.2021.19792.7114