



Chemical and Physical Effects of Carbon Dioxide Injection with Different Preheating Temperature in Flameless Combustion

E. Ebrahimi Fordoei and K. Mazaheri*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: The purpose of the present study is the numerical simulation of the flameless burner with carbon dioxide injection into the oxidizer stream using OpenFOAM software. Also, the effect of different amounts of oxidizer preheating temperature has been studied. In order to perform simulations from the partially stirred reactor combustion model, the standard k- ϵ turbulence model with modified coefficients and discrete phase radiation model with the calculation of adsorption and emission coefficients using weighted sum of gray gases mode model with non-gray gas coefficients have been used. The results of the present study indicate that the physical effects of carbon dioxide degradation will reduce the amount of heat release and the amount of carbon monoxide produced, while the chemical effects of this injection result in a significant increase in these amounts. Increasing the mass fraction of injection from 0.25 to 0.75 leads to a change in the maximum mass fraction of carbon monoxide produced from 0.05 to 0.072. Also, the chemical effect of the injection changes the flame structure and increased carbon monoxide emissions by increasing the preheating temperature. The chemical effect of carbon dioxide injection on the production of NOx pollutants is such that, with increasing temperature, the amount of NOx emission is increased.

Review History:

Received: 02/01/2018

Revised: 09/01/2018

Accepted: 24/06/2018

Available Online: 30/06/2018

Keywords:

Flameless combustion

Physical and chemical effect

Carbon dioxide injection

Flame structure

Pollution distribution

1. INTRODUCTION

Flameless combustion is one of the combustion regimes based on the strong recirculation of the combustion products into the oxidizer to dilute and pre-heat the reacting mixture. Therefore, the structure of the oxidizer plays a major role in the heat transfer and flame structure in this combustion process. Extensive studies have been done on the effect of oxidizer structures on the flameless combustion. Tu and et al. [1] examined the physical and chemical effects of Carbon dioxide (CO_2) injections into the hot co-flow in the flameless combustion burner. The results show that the replacement of CO_2 with N_2 causes delayed ignition of oxy-fuel combustion.

In the present study, the physical (specific heat capacity, radiation properties, molecular mass, density and molecular diffusion coefficients of carbon dioxide in comparison with nitrogen) and chemical (active carbon dioxide in chemical reactions compared with nitrogen) effects of replacement of CO_2 by N_2 has been investigated. In addition, the oxidizer pre-heating temperature effects have been discussed on the physical and chemical effects of carbon dioxide injections.

2. COMPUTATIONAL DETAILS

In order to perform the numerical simulations, flameless combustion burner made by Dally et al. [2] has been used.

*Corresponding author's email: kiumars@modares.ac.ir

In accordance with Fig. 1, the axisymmetric computational domain is used for the simulations. The governing boundary conditions are shown in Fig. 1 and these applied in accordance with Table 1.

OpenFOAM software has been used to perform numerical simulations. The standard k- ϵ model was used with the modified coefficient C_{el} from 1.44 to 1.6. In addition, for the modeling interactions of turbulence and chemistry of reactions, the Partially Stirred Reactor (PaSR) combustion model has been used.

Discrete Ordinate (DO) model is used to calculation of radiative heat transfer. Also, the GRI2.11 chemical mechanisms have been used due to better prediction of the temperature and combustion species distribution (especially NOx) [3].

The PIMPLE algorithm is used for the elimination of coupling between velocity and pressure. The convergences criteria of the solution also take into account the residuals of all equations equal to 10^{-7} .

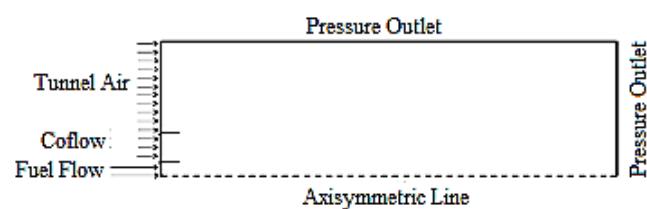


Fig. 1: Computational domain and boundary conditions



Table 1. The governing boundary conditions

No.	$T_{product}$ (K)	Co-flow Mass Fraction (%)	Tunnel Air Mass Fraction (%)
1	1300	$O_2=3, CO_2=5.5, H_2O=6.5, N_2=85, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=77, XCO_2=0$
2	1300	$O_2=6, CO_2=5.5, H_2O=6.5, N_2=82, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=77, XCO_2=0$
3	1300	$O_2=9, CO_2=5.5, H_2O=6.5, N_2=79, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=77, XCO_2=0$
4	1300	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=97, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=77, XCO_2=0$
5	1300	$O_2=3, CO_2=25, H_2O=0, N_2=72, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=25, H_2O=0, N_2=52, XCO_2=0$
5X	1300	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=72, XCO_2=25$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=52, XCO_2=25$
6	1300	$O_2=3, CO_2=50, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=50, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=0$
6X	1300	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=50$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=50$
7	1300	$O_2=3, CO_2=75, H_2O=0, N_2=22, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=75, H_2O=0, N_2=2, XCO_2=0$
7X	1300	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=22, XCO_2=75$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=2, XCO_2=75$
8	1100	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=97, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=50, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=0$
9	1100	$O_2=3, CO_2=50, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=50, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=0$
9XT	1100	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=50$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=2, XCO_2=50$

3. RESULTS AND DISCUSSION

The grid independency results show that the network with 42550 cells has independent results for the simulations.

The results of the solver validation are presented. An average error of 10% indicates a good agreement between the results with experimental data (Fig. 2).

As shown in Fig. 3, the physical effect of CO_2 injection leads to a significant reduction in the maximum Hydroxyl (OH) mass fraction, which increases with an increase in CO_2 injection. decreasing of OH produced is due to higher heat absorption by CO_2 injection due to its higher heat capacity than nitrogen. The chemical effect of CO_2 injection is such that it leads to an increase in the OH mass fraction through the reaction $H + O_2 \leftrightarrow O + OH$.

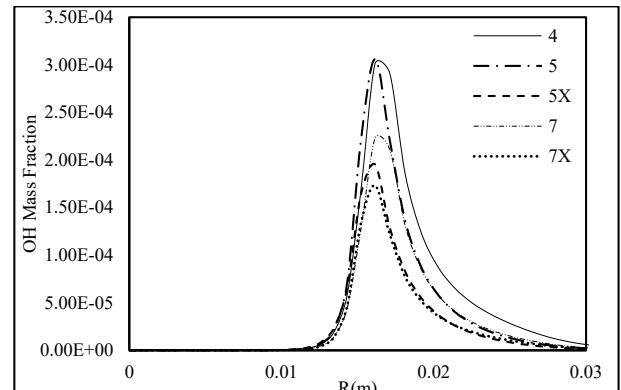


Fig. 3. OH distribution in 90 cm from inlets in different CO_2 mass fraction injection

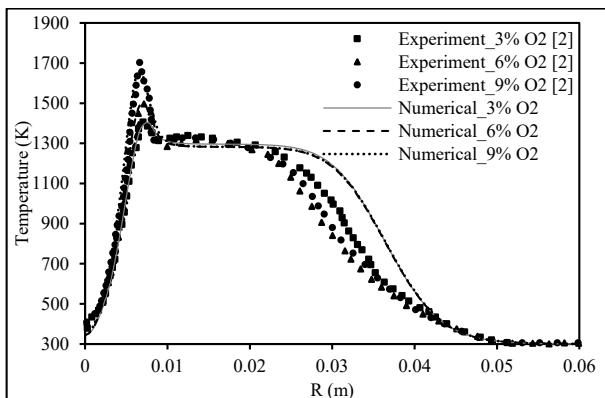


Fig. 2. Temperature variation in 90 cm from inlets

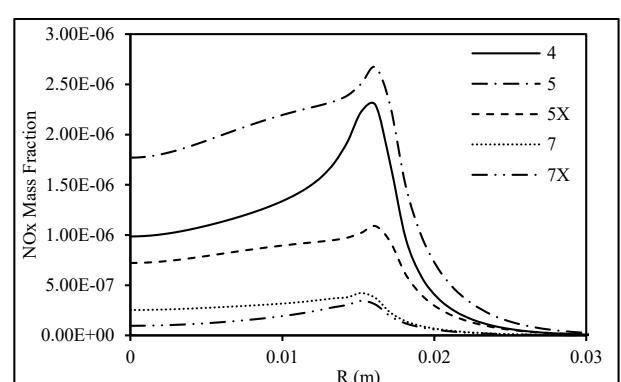


Fig. 4: NOx distribution in 90 cm from inlets in different CO_2 mass fraction injection

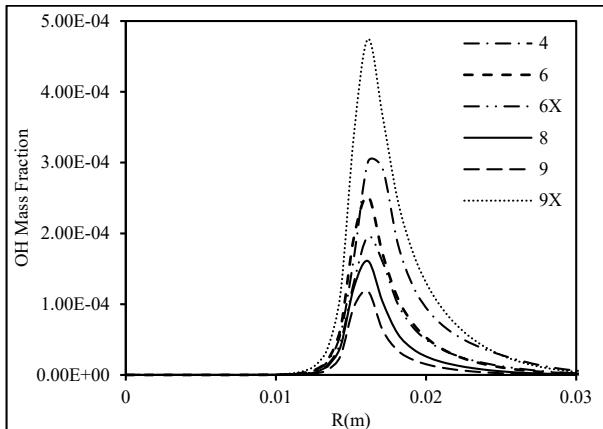


Fig. 5: Effect of co-flow pre-heating temperature on the CO_2 injection in oxidizer on OH distribution

The effects of CO_2 injection into the oxidizer is shown in Fig. 4. As can be seen, injection of high levels of carbon dioxide, physically and chemically, results in a reduction in the mass fraction of NOx. while CO_2 injection equals 25% of the oxidizer mass fraction of different physical and chemical behaviors. In this case, the physical effect of the injection results in a reduction in the NOx production due to a decrease in the maximum temperature and also a reduction in the amount of nitrogen available for the production of NOx, while the HCN behavior results in a significant increase in the production of NOx.

The OH mass fraction increases in higher preheating temperature. The increase in temperature led to a further dissociation of H_2O through the reaction of $\text{OH} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$, which increases the hydroxyl produced.

The physical impact of the injection of CO_2 into oxidizer leads to a significant decrease in NOx emissions due to a reduction in the maximum temperature. Contrary to the physical effect, the chemical effect of carbon dioxide injections results in an increase in the amount of NOx released. This issue is due to the presence of CO_2 in the reaction $\text{N}_2 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{NCO}$ (Fig. 6).

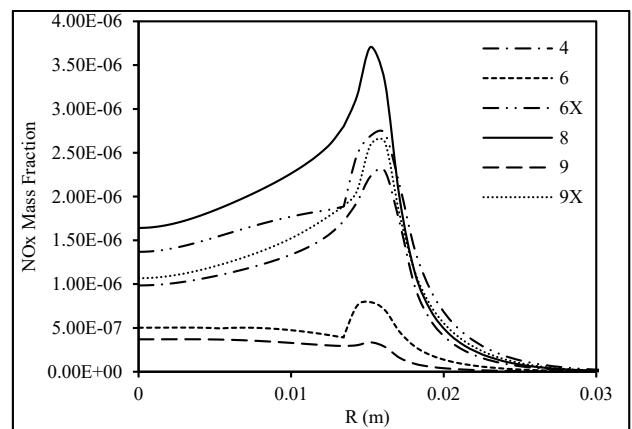


Fig. 6: Effect of coflow pre-heating temperature on the CO_2 injection in oxidizer on NOx distribution

4. CONCLUSION

The important results of the chemical and physical effects of CO_2 added to oxidizer in different preheating temperature into the Flameless burner are included: The increase in the amount of CO_2 injected leads to a decrease in the rate of reactions by reducing the concentration of radical hydroxyl. In addition, with increasing injection rates due to the decrease in maximum temperature, NOx contamination levels are significantly reduced; increasing the oxidizer pre-heating temperature increases the chemical effect of CO_2 injection into the oxidizer stream.

REFERENCES

- [1] Y. Tu, H. Liu, W. Yang, Flame Characteristics of CH_4/H_2 on a Jet-in-Hot-Coflow Burner Diluted by N_2 , CO_2 , and H_2O , Energy & Fuels, 31(3) (2017) 3270-3280.
- [2] B.B. Dally, A. Karpetis, R. Barlow, Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow, Proceedings of the combustion institute, 29(1) (2002) 1147-1154.
- [3] C. Bowman, R. Hanson, W. Gardiner, V. Lissianski, M. Frenklach, M. Goldenberg, G. Smith, GRI-Mech 2. 11: An Optimized Detailed Chemical Reaction Mechanism for Methane Combustion and NO Formation and Reburning, NASA, (19980005146) (1997).



بررسی تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن با مقادیر پیش گرمایش مختلف در احتراق بدون شعله

اسماعیل ابراهیمی فردوبی، کیومرث مظاہری*

دانشکده مهندسی مکانیک، تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲

بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۴/۰۹

کلمات کلیدی:

احتراق بدون شعله
تاثیر فیزیکی و شیمیایی
تزریق دی اکسید کربن
ساختار شعله
توزیع آلینده

خلاصه: هدف از مطالعه حاضر شبیه‌سازی عددی مشعل بدون شعله همراه با تزریق دی اکسید کربن درون جریان اکسید کننده با استفاده از نرم افزار متن باز اپن فوم است. همچنین اثر مقادیر مختلف دمای پیش گرمایش اکسید کننده در آن مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور انجام شبیه‌سازی‌ها از مدل احتراقی پی.آس.آر، مدل آشفتگی کا-اپسیلون استاندارد با ضرایب اصلاح شده و همچنین مدل تشبع‌شده فاز گستته همراه با محاسبه ضرایب جذب و گسیل با استفاده از مدل دبلیو اس.جی.ام با ضرایب گاز غیر خاکستری استفاده شده است. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر نشان‌دهنده آن است که اثرات فیزیکی ناشی از تزریق دی اکسید کربن منجر به کاهش میزان آزادسازی حرارت و میزان کربن مونوکسید تولید شده می‌گردد در حالی که اثرات شیمیایی این تزریق منجر به افزایش قابل توجهی در این مقادیر می‌شود. افزایش میزان کسر جرمی تزریق از ۰/۲۵ به ۰/۷۵ منجر به تغییر بیشینه کسر جرمی مونوکسید کربن تولید شده از ۰/۰۵ به ۰/۰۲۲ می‌شود. همچنین با افزایش دمای اکسید کننده بر تاثیر شیمیایی تزریق بر روی ساختار شعله و انتشار آلینده مونوکسید کربن افزوده می‌شود. همچنین تاثیر شیمیایی تزریق دی اکسید کربن بر روی تولید آلینده ناکس به صورتی است که با افزایش دما منجر به افزایش میزان ناکس منتشر شده می‌شود.

۱- مقدمه

جداسازی و کاهش انتشار دی اکسید کربن به عنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای، استفاده از احتراق سوخت-اکسیژن و استفاده از حللاهای شیمیایی می‌باشد که استفاده از حللاهای در احتراق سوخت-هوای مورد توجه قرار دارد [۶]. در این روش‌ها دی اکسید کربن از محصولات احتراقی جدا گردیده و به منظور به کارگیری در سایر کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از موارد استفاده از دی اکسید کربن بازچرخش آن به درون محفظه احتراق از طریق ترکیب آن با اکسید کننده می‌باشد [۶ و ۷]. اضافه نمودن دی اکسید کربن درون اکسید کننده و جایگزینی آن با نیتروژن با توجه به تفاوت‌های فیزیکی آن‌ها با یکدیگر و همچنین مشارکت دی اکسید کربن در واکنش‌های شیمیایی منجر به تفاوت‌های اساسی در فرآیند احتراق می‌گردد [۸]. از این‌رو مطالعات گسترده‌ای پیرامون اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن انجام شده است. وانگ و همکاران [۹] به مطالعه عددی اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن بر روی احتراق متان با استفاده از حلگر شعله غیر پیش‌آمیخته جریان

احتراق بدون شعله یکی از فرآیندهای نوین احتراقی است که در سال‌های اخیر به عنوان یکی از بهترین روش‌ها جهت کاهش آلینده ناکس همزمان با افزایش بازدهی سیستم‌های احتراقی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۱ و ۲]. یکی از الزامات جهت دستیابی به این فرآیند احتراقی، رسیدن دمای مخلوط سوخت و هوا پیش از وقوع فرآیند احتراق به دمای خوداشتعالی آن و کاهش غلظت اکسیژن در ناحیه واکنشی به وسیله بازچرخش محصولات احتراقی می‌باشد [۲-۵]. عمدۀ محصول فرآیند احتراق سوخت-هوای که به منظور بازچرخش جهت دست‌یابی به احتراق بدون شعله مورد استفاده قرار می‌گیرد، نیتروژن می‌باشد که گازی خنثی بوده و در واکنش‌های شیمیایی شرکت نمی‌کند. در سال‌های اخیر با توجه به مسئله گرمایش جهانی در اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش انتشار این گازها مورد توجه محققین قرار گرفته است. دو روش عمدۀ جهت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kiumars@moares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسنده‌گان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



انجام پذیرفت. نتایج بدست آمده از این بررسی نشان می‌دهد که بازچرخش دی‌اکسید کربن و تزریق آن درون اکسیدکننده با توجه به کاهش دمای بیشینه فرآیند احتراق منجر به کاسته شدن میزان آلاینده ناکس به صورت قابل توجهی می‌شود. مطالعه دیگر انجام شده توسط گاسکوین و همکاران [۱۳] می‌باشد؛ این مطالعه بر روی اثرات حرارتی تزریق دی‌اکسید کربن بر میزان آلاینده ناکس منتشر شده با استفاده از حلگر شعله غیر پیش‌آمیخته جریان متقابل صورت گرفته است. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که تزریق دی‌اکسید کربن منجر به کاهش دما و در نتیجه ناکس حرارتی می‌گردد. علاوه‌بر این تغییرات نرخ کرنش با وجود تاثیر کم بر روی دما، می‌تواند اثر قابل توجهی بر روی میزان ناکس منتشر شده گذاشته و با افزایش نرخ کرنش، میزان آلاینده ناکس نیز به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد.

یکی از چالش‌هایی که پیرامون تغییر سیستم‌های احتراقی سنتی سوخت-هوا به سیستم‌های احتراقی سوخت-اکسیژن وجود دارد، دمای بالای شعله در فرآیند احتراقی سوخت-اکسیژن می‌باشد. یکی از روش‌هایی که در این زمینه در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است تا بدون تغییر سیستم احتراقی و مشعل‌های آن بتوان به شرایط احتراقی مشابهی دست پیدا کرد، بازچرخش دی‌اکسید کربن و بخارآب درون اکسیدکننده می‌باشد. سونگ و همکاران [۱۴] به مطالعه عددی مکانیزم شیمیایی تاثیر دی‌اکسید کربن بر روی توزیع دما در احتراق متان-اکسیژن پرداختند. در این مطالعه بررسی‌های لازم جهت جایگزینی سیستم‌های احتراقی متان-هوا موجود با سیستم‌های متان- O_2 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در محیط O_2/CO_2 نیاز به غلظت اکسیژنی حدود ده درصد بیشتر از احتراق سوخت-هوا می‌باشد تا بتوان به شرایط احتراقی مشابهی رسید.

مطالعاتی که تاکنون بر روی اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن صورت گرفته بیشتر بر روی احتراق سوخت-اکسیژن مرکز بوده و به کمک حلگر شعله غیر پیش‌آمیخته که در آن جریان آرام در نظر گرفته می‌شود، انجام شده است. علاوه بر این، در بررسی‌های انجام شده تاثیر اثرات فیزیکی و شیمیایی بر روی ساختار شعله بوده و بحث بر روی آلاینده‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. در مطالعه حاضر با استفاده از مشعل جی‌اچ‌سی

متقابل^۱ پرداختند. در این بررسی مشاهده شد که اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن منجر به کاهش دمای بیشینه شعله می‌شود. علاوه‌بر این نتایج بدست آمده از این بررسی نشان دهنده افزایش میزان تولید مونوکسید کربن در نتیجه تاثیر شیمیایی تزریق می‌باشد، در حالی که اثرات فیزیکی تزریق منجر به کاهش میزان انتشار مونوکسید کربن تولیدی می‌گردد. چن و همکاران [۱۰] نیز به مطالعه عددی تاثیر شرایط رقیق‌سازی با استفاده از دی‌اکسید کربن و آب بر احتراق سوخت-اکسیژن بدون شعله پرداختند. در این مطالعه مشاهده شد که در شرایط استفاده از دی‌اکسید کربن و آب به عنوان بخشی از اکسیدکننده، با کاهش غلظت اکسیژن در سمت اکسیدکننده به کمتر از ۶ درصد کسر جرمی و یا کاهش دمای اکسیدکننده به کمتر از ۱۵۰۰ کلوین فرآیند احتراق صورت نخواهد گرفت. همچنین تزریق آب منجر به ایجاد شعله‌ای کوتاه‌تر نسبت به حالت تزریق دی‌اکسید کربن می‌گردد.

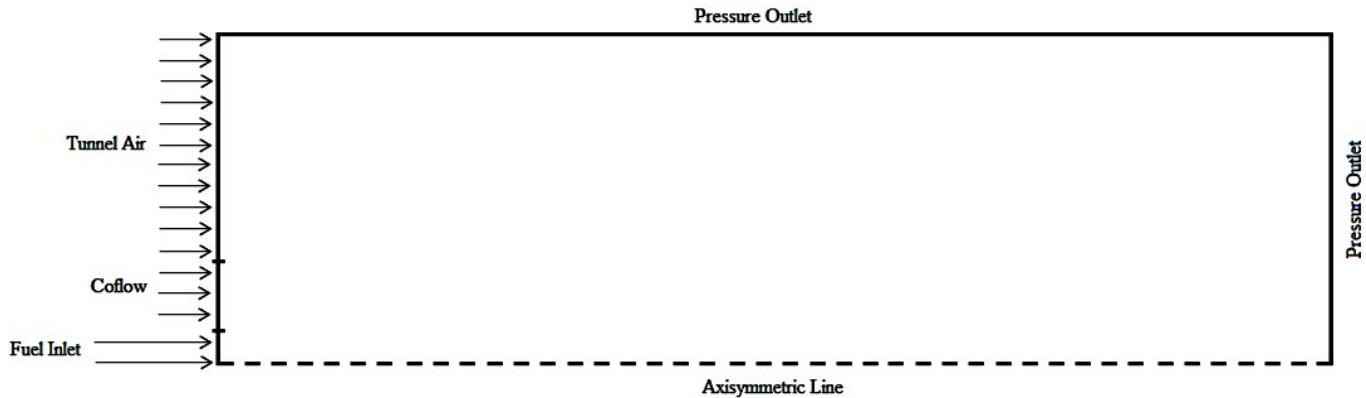
تو و همکاران [۸] به بررسی اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن درون جریان محصولات داغ احتراقی با استفاده از مشعل جی‌اچ‌سی^۲ با ورودی اصلاح شده در احتراق سوخت-اکسیژن بدون شعله پرداختند. در این مطالعه محدوده حل عددی با توجه به مطالعه صورت گرفته در مرجع [۱۱] تنها شامل ورودی سوخت و محصولات بازچرخش یافته احتراقی بود. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می‌دهند که جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن سبب می‌شود تا اشتغال در احتراق سوخت-اکسیژن با تاخیر مواجه شود؛ همچنین این تزریق منجر می‌شود تا توزیع دمای یکنواخت‌تری نسبت به حالت احتراق سوخت-هوا بدون شعله ایجاد شود که این موضوع به علت ظرفیت حرارتی بالای دی‌اکسید کربن در جذب و سپس آزادسازی حرارت در محدوده حل عددی می‌باشد.

یکی از اثرات مهم ساختار اکسیدکننده و گونه رقیق‌کننده جهت کاهش غلظت اکسیژن در ناحیه واکنشی بهمنظور ایجاد احتراق بدون شعله بر روی میزان آلاینده ناکس^۳ تولید شده می‌باشد. مطالعه عددی رفتار انتشار آلاینده ناکس در احتراق سوخت-اکسیژن همراه با بازچرخش دی‌اکسید کربن و بررسی اثرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از این بازچرخش توسط پارک و همکاران [۱۲]

1 Counter Flow Diffusion Flame

2 Jet Hot Coflow (JHC)

3 NO_x



شکل ۱: محدوده حل عددی و شرایط مرزی حاکم بر مسئله

Fig. 1: Numerical solution domain and governing boundary conditions on the problem

خارجی ۲۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. طول محدوده حل عددی نیز برابر با ۵۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که این فاصله امکان اعمال شرایط مناسب و فیزیکی را فراهم می‌آورد.

۲-۱- شرایط مرزی حاکم بر مسئله

شرایط مرزی حاکم بر مسئله با توجه به مرزهای بیان شده در شکل ۱ مطابق با جدول ۱ می‌باشد. در این جدول ردیفهای اول تا سوم مربوط به شرایط حاکم بر حل تجربی می‌باشند که به منظور اعتبارسنجی حلگر مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ردیفهای ۴ تا ۷X شرایط مرزی حاکم به منظور بررسی تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق مقداری مختلفی از دی‌اکسید کربن را شامل گردیده و ردیفهای ۸ تا ۱۱ XT نیز شامل بررسی اثر دمای پیش‌گرمایش اکسیدکننده بر تاثیر فیزیکی و شیمیایی ناشی از تزریق ۵۰ درصد کسر جرمی دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده را شامل می‌شود.

۲-۲- روش حل عددی

از نرمافزار متن باز اپن‌فوم به منظور انجام شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است که در آن معادلات متوسط‌گیری شده ناوبر-استوکس در شرایط آشفته حل می‌گردد. جهت مدل‌سازی آشفتگی از مدل کا-اپسیلون^۱ استاندار همراه با اصلاح ضریب C_{ϵ} از $1/44$ به

و شبیه‌سازی متقارن محوری آن به بررسی اثرات فیزیکی (ظرفیت گرمایی ویژه، خواص تشعشعی، جرم مولکولی، چگالی و ضرایب نفوذ مولکولی متفاوت دی‌اکسید کربن در مقایسه با نیتروژن) و شیمیایی (حضور فعال دی‌اکسید کربن در واکنش‌های شیمیایی در مقایسه با نیتروژن) ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن بر ساختار شعله و تولید آلاینده‌ها در احتراق متان/هیدروژن-هوا پرداخته شده است که تا کنون در مطالعات دیگر مورد بررسی قرار نگرفته است. علاوه‌بر این اثر تغییرات دمای پیش‌گرمایش اکسیدکننده نیز بر روی اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲-۳- شرایط حل عددی

۲-۱-۱- هندسه و محدوده حل عددی

به منظور انجام شبیه‌سازی عددی مورد نظر از هندسه و مشعل احتراقی بدون شعله ساخته شده توسط دالی و همکارانش [۱۵ و ۱۶] استفاده شده است. مطابق با شکل ۱ از محدوده حل متقارن محوری با توجه به هندسه و فیزیک متقارن حاکم بر مسئله استفاده شده است؛ سوخت از ناحیه مرکزی و لوله‌ای به قطر $4/25$ میلی‌متر وارد مشعل می‌شود. به منظور دستیابی به احتراق بدون شعله از جریان محصولات داغ احتراقی با قطر خارجی $77/75$ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین در بررسی تجزیی مشعل درون تونل بادی قرار داده شده است که به منظور برقراری اعمال شرایط مرزی مناسب، ورودی هوای تونل باد بر اساس سایر مطالعات صورت گرفته ناحیه‌ای به قطر

جدول ۱: شرایط مرزی دمایی و کسر جرمی گونه‌ها مختلف سمت اکسیدکننده در شرایط مختلف شبیه‌سازی

Tabel 1: Thermal boundary conditions and different species mass fraction on the oxidizer side in different conditions simulation

ردیف	دماه مخصوصات احتراق (K)	کسر جرمی گونه‌های مخصوصات احتراق (درصد جرمی)	کسر جرمی گونه‌ها مختلط احتراق (درصد جرمی)
شرایط مرزی حاکم بر مسئله جهت اعتبارسنجی حلگر و شایط حل عددی انتخاب شده (برای سه کسر جرمی اکسیژن متفاوت ۳، ۶ و ۹ درصد)			
۱	۱۳۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۵/۵ ، H ₂ O=۶/۵ ، N ₂ =۸۵ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۷۷ ، XCO ₂ =۰
۲	۱۳۰۰	O ₂ =۶ ، CO ₂ =۵/۵ ، H ₂ O=۶/۵ ، N ₂ =۸۲ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۷۷ ، XCO ₂ =۰
۳	۱۳۰۰	O ₂ =۹ ، CO ₂ =۵/۵ ، H ₂ O=۶/۵ ، N ₂ =۷۹ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۷۷ ، XCO ₂ =۰
تأثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق مقادیر مختلف دی اکسید کربن (ردیف ۴) مربوط به شرایط استفاده از نیتروژن خالص به همراه ۳ درصد کسر جرمی O ₂ در سمت اکسیدکننده می‌باشد. ردیف‌های ۵ و ۷ نیز به ترتیب مربوط به جایگزینی ۰۵ و ۰۷۵ درصد از نیتروژن با CO ₂ می‌باشد. ردیف‌های ۵X و ۷X نیز مربوط به جایگزینی ۰۲۵ و ۰۵۰ درصد از N ₂ با گونه مجازی X در سمت اکسیدکننده می‌باشد.			
۴	۱۳۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۹۷ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۷۷ ، XCO ₂ =۰
۵	۱۳۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۲۵ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۷۲ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۵۲ ، XCO ₂ =۰
۵X	۱۳۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۷۲ ، XCO ₂ =۲۵	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۵۲ ، XCO ₂ =۰
۶	۱۳۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۵۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۴۷ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۷ ، XCO ₂ =۰
۶X	۱۳۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۴۷ ، XCO ₂ =۵۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۷ ، XCO ₂ =۰
۷	۱۳۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۷۵ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۲ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲ ، XCO ₂ =۷۵
۷X	۱۳۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۲ ، XCO ₂ =۷۵	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲ ، XCO ₂ =۰
تأثیر مقادیر پیش‌گرایش مختلف بر اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق CO ₂ در جریان اکسیدکننده (ردیف ۸) مربوط به شرایط استفاده از نیتروژن خالص در سمت اکسیدکننده با دماه پیش‌گرایش ۱۱۰۰ کلوین می‌باشد. ردیف‌های ۹ و ۹XT نیز به ترتیب مربوط به شرایط جایگزینی ۰۵ درصد کسر جرمی نیتروژن با CO ₂ در جریان اکسیدکننده می‌باشد. سه ردیف بعد شرایطی کاملاً مشابه با سه ردیف توضیح داده شده داشته و تنها دماه پیش‌گرایش در آن‌ها ۱۵۰۰ کلوین است)			
۸	۱۱۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۹۷ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۵۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۷ ، XCO ₂ =۰
۹	۱۱۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۵۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۴۷ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۷ ، XCO ₂ =۰
۹XT	۱۱۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۴۷ ، XCO ₂ =۵۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۷ ، XCO ₂ =۰
۱۰	۱۵۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۹۷ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۷ ، XCO ₂ =۰
۱۱	۱۵۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۴۷ ، XCO ₂ =۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۷ ، XCO ₂ =۰
۱۱XT	۱۵۰۰	O ₂ =۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۴۷ ، XCO ₂ =۵۰	O ₂ =۲۳ ، CO ₂ =۰ ، H ₂ O=۰ ، N ₂ =۲۷ ، XCO ₂ =۰

جدول ۲ ضرایب مربوط به شرایط تشعشعی گاز غیرخاکستری

Table 2: The coefficients for non-gray gas radiation conditions

میزان ترزیق CO_2	طول موج (میکرومتر μm)					
	۰/-۰	۲/۵-	۳/۰-	۴/۰-	۵/۰-	۹/۰-
۲/۵	۲۵	۳۰	۴۰	۵۰	۹۰	۲۰
۲۵	۰	۰/۷۵	۰	۰/۷۸	۰	۰/۷۲
۵۰	۰	۰/۷۹	۰	۰/۸۲	۰	۰/۷۵
۷۵	۰	۰/۸۲	۰	۰/۸۵	۰	۰/۷۸

از طرفی تفاوت شیمیایی این دو گونه نیز مربوط به حضور آنها در واکنش‌های شیمیایی می‌باشد. حضور دی‌اکسید کربن در واکنش‌های تجزیه‌ای که منجر به تولید مونو‌اکسید کربن و همچنین جذب گرمایی از طرفی احتراق می‌شود، تاثیر بهسزایی روی پیش‌بینی صحیح توزیع دما و همچنین توزیع آلاینده‌های ناکس و کربن مونوکسید خواهد داشت. در واقع منظور از تاثیر فیزیکی تفاوت میان ظرفیت گرمایی ویژه، خواص تشعشعی، چگالی، جرم مولکولی و محاسبه ضریب نفوذ مولکولی بین نیتروژن و گونه مجازی X می‌باشد. منظور از تاثیر شیمیایی ترزیق دی‌اکسید کربن نیز تفاوت ناشی از حضور دی‌اکسید کربن در واکنش‌های شیمیایی با گونه مجازی X است که در واکنش‌های شیمیایی شرکت نمی‌کند.

در این مطالعه به منظور مشاهده تاثیر فیزیکی و شیمیایی جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن از گونه مجازی X استفاده شده است. این گونه خواص فیزیکی (ظرفیت حرارتی، خواص تشعشعی، خواص نفوذی، چگالی، جرم مولکولی و ...) کاملاً مشابهی با دی‌اکسید کربن داشته اما در واکنش‌های شیمیایی شرکت نمی‌کند. این کار با افزودن این گونه به سینتیک GRI2.11 انجام شده است به نحوی که زنجیره واکنش‌ها دستخوش تغییر نشده و این گونه در هیچ یک از واکنش‌ها شرکت ندارد. مقایسه حالت ترزیق گونه مجازی X با حالت ترزیق نیتروژن خالص بیانگر تاثیر فیزیکی ناشی از جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن می‌باشد، در حالی که مقایسه میان نتایج بدست آمده از ترزیق دی‌اکسید کربن با گونه مجازی X بیانگر تاثیر شیمیایی این ترزیق است.

۴- نتایج

۴-۱- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی حلگر مورد استفاده به منظور انجام شبیه‌سازی عددی از شبکه کاملاً ساختار یافته

۱/۶ استفاده شده است. این کار به علت خطای بالای مدل آشفتگی کا-پسیلون استاندارد در پیش‌بینی جت‌های دایروی و بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته در مراجع [۱۸] و [۱۷] انجام شده است. علاوه‌بر این جهت مدل‌سازی برهم‌کنش آشفتگی و شیمی واکنش‌ها از مدل احتراقی پی.آ.اس.آر^۱ موجود در حلگر ریاکتینگ‌فوم^۲ استفاده شده است.

یکی از موضوعاتی که در شبیه‌سازی عددی جریان‌های واکنشی از اهمیت بالایی برخوردار است، مدل‌سازی تشعشع گازهای حاصل از فرآیند احتراق می‌باشد. بررسی‌ها انجام شده بر روی مشعل بدون شعله مورد مطالعه نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی آن می‌توان از مدل‌سازی تشعشع صرف‌نظر کرد. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر از طرفی اثر ترزیق دی‌اکسید کربن به صورت فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته و تشعشع یکی از خواص فیزیکی مهم به شمار می‌آید و از طرف دیگر خواص دی‌اکسید کربن کاملاً با نیتروژن تفاوت دارد، از مدل تعشعشی فاز گسسته جهت انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. در محاسبه ضرایب جذب و گسیل از مدل متوسط‌گیری شده گازهای غیرخاکستری با شش پهنه‌ای باند به صورت جدول ۲ مطابق با مطالعه صورت گرفته توسط کامبر و همکاران [۱۹] استفاده شده است. همچنین از سینتیک شیمیایی GRI 2.11 به پیش‌بینی بهتر توزیع دما و گونه‌های احتراقی به خصوص آلاینده ناکس استفاده شده است. این سینتیک شامل ۴۹ گونه و ۲۷۷ واکنش شیمیایی می‌باشد [۲۰].

الگوریتم پیمپل^۳ به منظور بر طرف کردن کوپلینگ میان سرعت و فشار مورد استفاده قرار گرفته است. بهمنظور گسسته‌سازی ترم‌های جابه‌جاوی از روش کوئیک^۴ استفاده شده است. معیار پایایی و همگرایی حل نیز در نظر گرفتن باقی‌مانده کلیه ترم‌ها برابر با 10^{-7} و همچنین عدم تغییرات دما و سرعت در خروجی یه میزان کمتر از ۱ کلوین و ۰/۱ متر بر ثانیه پس از یک دهم ثانیه می‌باشد.

۳- روش بررسی تاثیر فیزیکی و شیمیایی ترزیق دی‌اکسید کربن

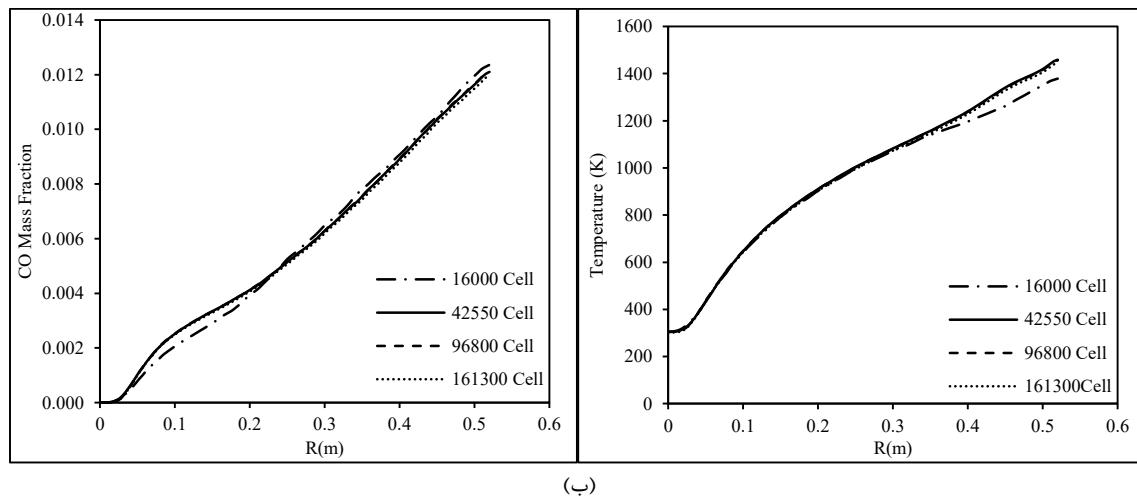
تفاوت‌های فیزیکی دی‌اکسید کربن با نیتروژن شامل تفاوت در ظرفیت گرمایی ویژه، خواص تشعشعی و نفوذ مولکولی می‌شود.

۱ Partially Stirred Reactor (PaSR)

۲ ReactingFOAM

۳ PIMPLE

۴ QUICK



شکل ۲: استقلال نتایج از شبکه عددی ایجاد شده (الف) توزیع دما روی خط مرکزی مشعل

Fig. 2: Independent results from created numerical grid a) temperature distribution on the burner centerline, b) Carbon monoxide distribution on the burner centerline

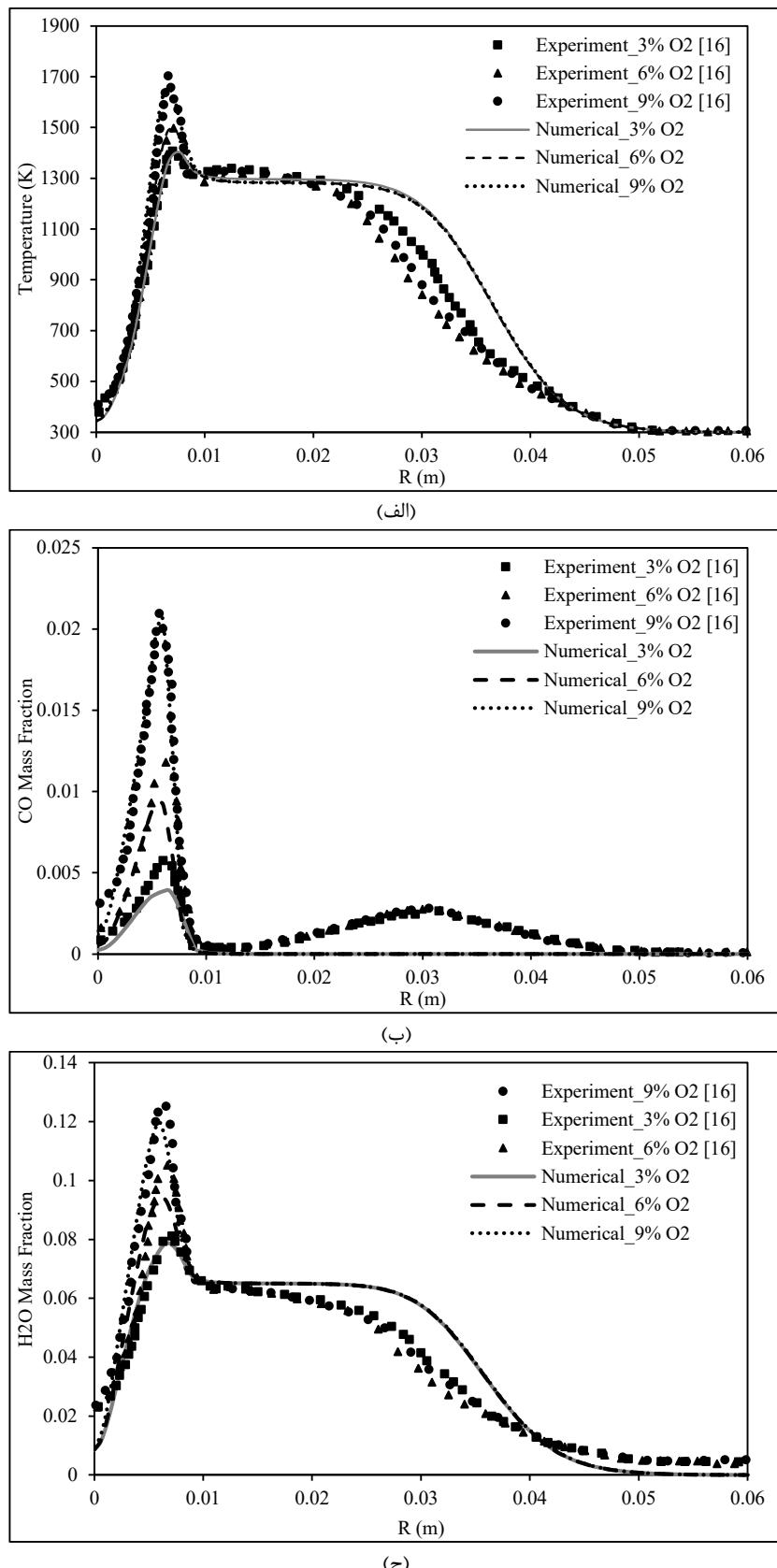
۱-۲-۴ تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق دیاکسید کربن بر ساختار شعله

از مهمترین اثرات ناشی از جایگزینی دیاکسید کربن با نیتروژن در جریان اکسیدکننده تغییر ساختار شعله تشکیل شده می‌باشد. یکی از مهمترین گونه‌ها در فرآیندهای احتراقی که نقش اساسی در واکنش‌های شیمیایی و همچنین آزادسازی حرارت ایفا می‌کند، توزیع رادیکال هیدروکسیل (OH) می‌باشد. از این‌رو در شکل ۲-۴ نتایج تغییرات شعاعی غلظت این رادیکال برای مقادیر تزریق ۰.۲۵ و ۰.۷۵ درصد جرمی دیاکسید کربن و همچنین گونه مجازی X برای بررسی‌های انجام گرفته مطابق با جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۲-۴، تاثیر فیزیکی تزریق دیاکسید کربن به گونه‌ای است که منجر به کاهش قابل توجهی در مقدار بیشینه غلظت رادیکال هیدروکسیل می‌گردد که این کاهش با افزایش تزریق دیاکسید کربن، افزایش می‌یابد. کاهش میزان OH تولید شده در این شرایط به علت جذب حرارت بیشتر در شرایط تزریق دیاکسید کربن با توجه به ظرفیت حرارتی بالاتر آن نسبت به نیتروژن می‌باشد؛ این موضوع سبب می‌شود تا نرخ واکنش $\text{OH} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$ که مهمترین واکنش در تولید OH است، کاهش پیدا کند. از طرفی در خروجی این اثر به علت آزادسازی حرارت بیشتر جذب شده (در نتیجه ظرفیت گرمایی ویژه بیشتر دیاکسید کربن نسبت به نیتروژن) منجر به افزایش غلظت این رادیکال می‌شود. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که تاثیر فیزیکی تزریق دیاکسید کربن منجر به توزیع

غیریکنواخت استفاده شده است. به منظور بررسی استقلال نتایج بدست آمده از شبکه محاسباتی از چهار شبکه ۱۶۰۰۰، ۴۲۵۵۰، ۹۶۸۰۰ و ۱۶۱۳۰۰ سلولی استفاده شده است. شکل ۲ نمودار تغییرات دما و کربن مونوکسید را بر روی محور مرکزی مشعل بدون شعله مورد بررسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبکه ۴۲۵۵۰ سلولی انتطاق بسیار خوبی با داده‌های بدست آمده از شبکه‌های ۹۶۸۰۰ و ۱۶۱۳۰۰ سلولی دارند. از این‌رو شبکه ۴۲۵۵۰ سلولی به عنوان شبکه‌ای که در آن نتایج بدست آمده مستقل از شبکه محاسباتی هستند، جهت انجام شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۳ نتایج مربوط به اعتبارسنجی حلگر مورد استفاده جهت انجام شبیه‌سازی‌ها آورده شده است. نتایج مربوط به توزیع دما و کسر جرمی گونه‌های مونوکسید کربن و بخارآب در این شکل مشاهده می‌شود. در جدول ۳ خطای متوسط مربوط به هر یک از این متغیرها در سه غلظت اکسیژن ۰.۳، ۰.۶ و ۰.۹ درصدی در جریان اکسیدکننده آورده شده است که مطابق با این جدول نتایج بدست آمده تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارند.

۴-۲-۴ تاثیر تزریق مقادیر مختلف دیاکسید کربن در جریان اکسیدکننده

درابتدا به بررسی تاثیر فیزیکی و شیمیایی مقادیر مختلف تزریق بر روی ساختار شعله و انتشار آلاینده‌های مونوکسید کربن و ناکس پرداخته می‌شود.



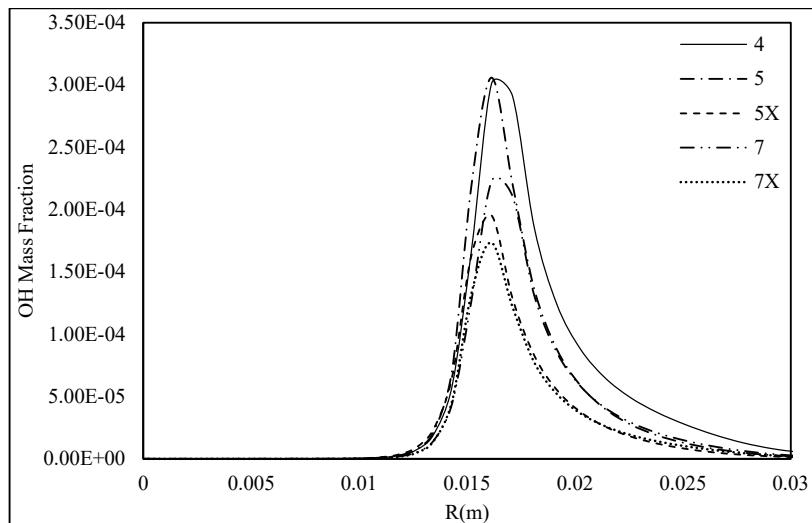
شکل ۳: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی در مقطع عرضی به فاصله ۳۰ سانتی‌متری از ابتدای مشعل، (الف) دما، (ب) کسر جرمی مونوکسید کربن، (ج) کسر جرمی بخار آب

Fig. 3: Comparison between experimental data with the obtained results from numerical simulation in the cross section of 30 cm from burner inlet, a) temperature, b) carbon monoxide mass fraction, c) water vapor mass fraction

جدول ۳: خطای متوسط دما، دی اکسید کربن و بخار آب در فاصله ۳۰ سانتی متری از ورودی های مشعل

Table 3: Average error of temperature, carbo dioxide and water vapor in the 30 cm from burner inlets

متغیر	درصد خطای متوسط		
	۳% O ₂	۶% O ₂	۹% O ₂
دما	۹	۱۲	۱۱
CO	۱۱	۱۴	۹
H ₂ O	۱۵	۱۸	۱۴



شکل ۴: اثر فیزیکی و شیمیابی تزریق دی اکسید کربن بر غلظت رادیکال هیدروکسیل در فاصله ۹۰ سانتی متری از ابتدای مشعل
Fig. 4: Chemical and physical effect of CO₂ injection on the OH mass fraction in 90cm from burner inlets

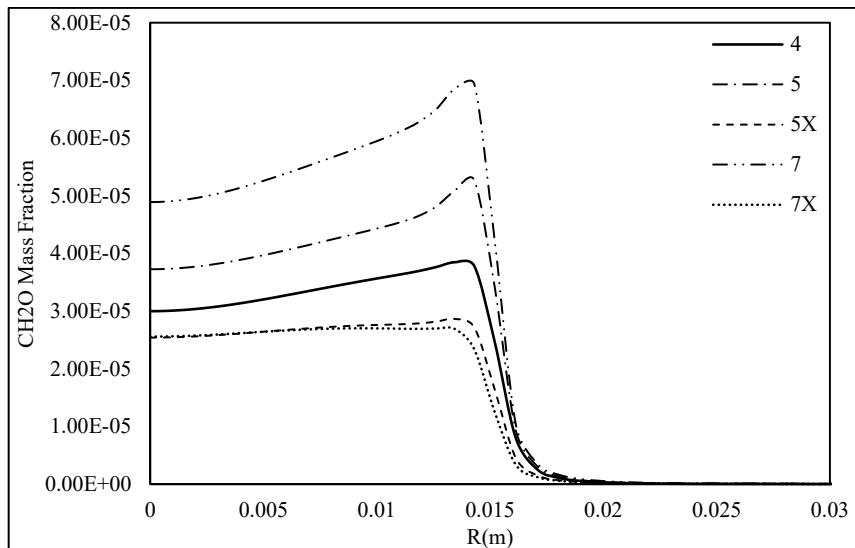
منجر به کاهش میزان درخشش شعله در شرایط تزریق دی اکسید کربن نسبت به اکسیژن می باشد که این موضوع با نتایج بدست آمده از مرجع [۸] مطابقت دارد.

گونه دیگری که در فرآیند احتراق از اهمیت بالایی برخوردار بوده و بیانگر میزان نرخ آزادسازی حرارت ناشی از واکنش های شیمیابی می باشد، گونه CH₂O است. تغییرات کسر جرمی این گونه در فاصله ۹۰ سانتی متری از ابتدای مشعل در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با این شکل اثرات فیزیکی تزریق دی اکسید کربن در مقطع مورد بررسی به گونه ای است که منجر به کاهش غلظت CH₂O می شود؛ در حالی که اثرات شیمیابی ناشی از حضور دی اکسید کربن در واکنش ها منجر به افزایش این گونه و در نتیجه آزادسازی حرارت می شود. بررسی های انجام شده بر روی واکنش های مختلفی که در آن گونه CH₂O مصرف و یا تولید می شوند نشان دهنده آن است که واکنش تزریق دی اکسید کربن بر روی تشکیل فرمالدهید (CH₂O) می باشد.

یکنواخت رادیکال هیدروکسیل گردیده که این موضوع بیانگر توزیع حرارت یکنواخت تر ایجاد شده نیز می باشد.

تأثیر شیمیابی تزریق دی اکسید کربن به گونه ای است که منجر به افزایش کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل از طریق واکنش H+O₂↔O+OH می گردد. در واقع شرکت دی اکسید کربن در واکنش های شیمیابی منجر به آزاد شدن رادیکال H بیشتری گردیده و این موضوع سبب می شود تا واکنش بیان شده به منظور تولید رادیکال هیدروکسیل با نرخ بیشتری انجام گردد.

میزان افزایش بیشینه رادیکال هیدروکسیل با افزایش میزان تزریق دی اکسید کربن کاهش می یابد. مطابق با نتایج بدست آمده برای واکنش های مختلف، این موضوع به علت کاهش تأثیر شرکت دی اکسید کربن در مقادیر تزریق بالای آن به علت کاهش دمای فرآیند احتراق و در نتیجه تاثیر کمتر آن بر نرخ واکنش های بیان شده می باشد. مجموع اثرات فیزیکی و شیمیابی تزریق دی اکسید کربن نیز نشان دهنده کاهش میزان رادیکال هیدروکسیل می باشد. این موضوع



شکل ۵: اثر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن بر کسر جرمی فرمالدهید در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از ابتدای مشعل

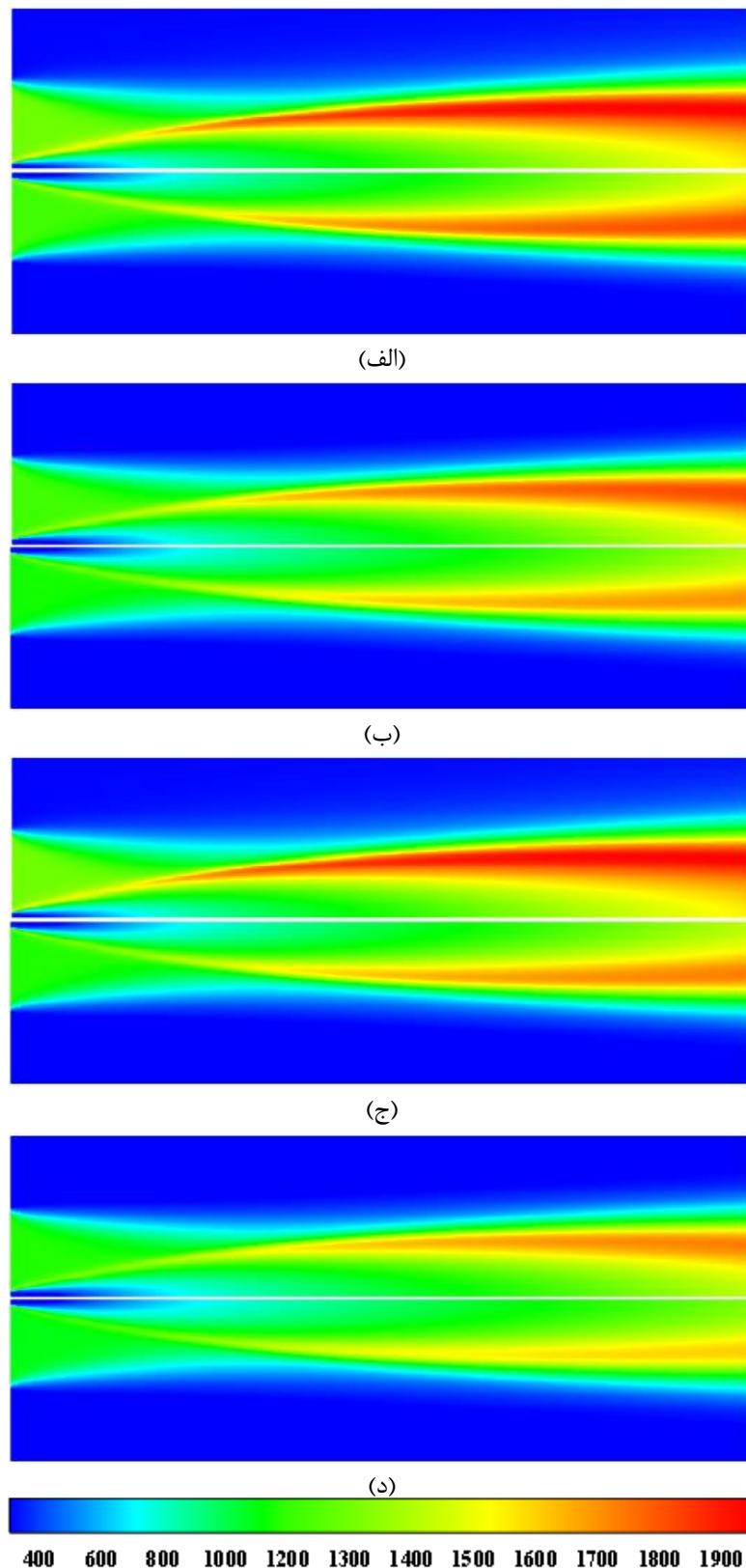
Fig. 5: Chemical and physical effect of CO₂ injection on the CH₂O mass fraction in 90cm from burner inlets

با قسمت‌های ب و د شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که تاثیر شیمیایی ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن نیز به گونه‌ای است که منجر به کاهش دما در ناحیه واکنشی می‌شود. این موضوع به علت گرماگیر بودن واکنش‌هایی است که دی‌اکسید کربن در آن‌ها حضور داشته و این موضوع منطبق با داده‌های بدست آمده در مرجع [۷] می‌باشد.

۴-۲-۲- تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن بر آلاینده مونو‌اکسید کربن و ناکس

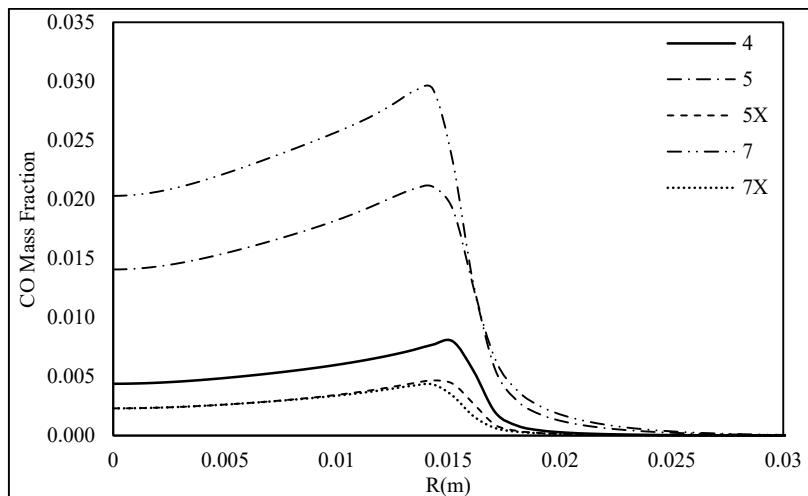
اثر دیگر مهم ناشی از جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن در جریان اکسیدکننده بر روی توزیع آلاینده‌ها می‌باشد. در شکل ۷ اثرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن بر توزیع مونوکسید کربن نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن بر تشکیل مونوکسید کربن کاملاً متفاوت با یکدیگر می‌باشد. تاثیر فیزیکی ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن منجر به کاهش میزان مونوکسید کربن تولیدی می‌شود. این موضوع به علت بیشتر بودن ظرفیت حرارتی دی‌اکسید کربن نسبت به نیتروژن بوده که منجر به جذب حرارت بیشتر از فرآیند احتراق گردیده و در نتیجه منجر به کاهش نرخ واکنش‌های تجزیه دی‌اکسید کربن به مونوکسید کربن می‌شود. از طرفی تاثیر شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن منجر به افزایش قابل توجهی در میزان کربن مونوگسید تولید شده می‌گردد. این افزایش از طریق فعل ترشدن واکنش

شکل ۶ تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن بر توزیع دما را نشان می‌دهد. در شکل ۶ الف و ب نتایج مربوط به تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق ۲۵ درصدی دی‌اکسید کربن به ترتیب نمایش داده شده است (در شکل ۶ الف تصویر بالا مربوط به شرایط استفاده از نیتروژن خالص می‌باشد (حالت ۴ جدول ۱) و شکل پایین مربوط به تزریق ۲۵ درصد گونه مجازی X (حالت ۵X جدول ۱) است. در شکل ۶ ب نیز تصویر بالا مربوط به تزریق ۲۵ درصد گونه مجازی X (حالت ۵X جدول ۱) و تصویر پایین مربوط به تزریق ۲۵ درصد دی‌اکسید کربن (حالت ۵ جدول ۱) است). در شکل ۶ ج و د نیز نتایج مربوط به تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق ۷۵ درصدی دی‌اکسید کربن به ترتیب نمایش داده است (در شکل ۶ ج تصویر بالا مربوط به شرایط استفاده از نیتروژن خالص می‌باشد (حالت ۴ جدول ۱) و شکل پایین مربوط به تزریق ۷۵ درصد گونه مجازی X (حالت ۷X جدول ۱) است. در شکل ۶ د نیز تصویر بالا مربوط به تزریق ۷۵ درصدی گونه X (حالت ۷X جدول ۱) و تصویر پایین مربوط به تزریق ۷۵ درصد دی‌اکسید کربن (حالت ۷ جدول ۱) است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان مشاهده کرد که تاثیر فیزیکی تزریق دی‌اکسید کربن بر توزیع دما به گونه‌ای است که منجر به کاهش دما می‌شود که این موضوع به علت ظرفیت حرارتی بالاتر دی‌اکسید کربن در مقایسه با نیتروژن می‌باشد. این تاثیر با افزایش میزان تزریق دی‌اکسید کربن مطابق با نتایج بدست آمده افزایش پیدا کرده است. همچنین مطابق



شکل ۶: تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن بر توزیع دما (الف) تزریق ۲۵ درصد گونه مجازی X (تاثیر فیزیکی تزریق)، ب) تزریق ۲۵ درصدی دی اکسید کربن (تاثیر شیمیایی تزریق)، ج) تزریق ۷۵ درصد گونه مجازی X (تاثیر فیزیکی تزریق)، د) تزریق ۷۵ درصدی دی اکسید کربن (تاثیر شیمیایی تزریق)

Fig. 6: Chemical and physical effect of CO₂ injection on the temperature distribution a) 25% injection of X virtual species (physical effect of injection), b) 25% injection of CO₂ species (chemical effect of injection), c) 75% injection of X



شکل ۷: اثر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن بر کسر جرمی کربن مونوکسید در فاصله ۹۰ سانتی متری از ابتدای مشعل
Fig. 7: Chemical and physical effect of CO₂ injection on the CO mass fraction in 90cm from burner inlet

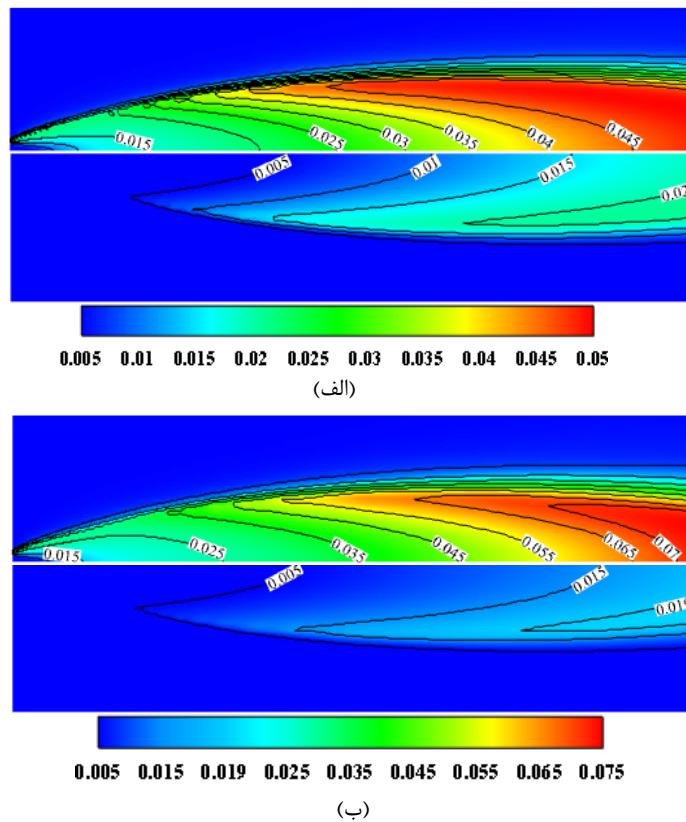
همچنین کاهش میزان نیتروژن در دسترس برای تولید آلاینده ناکس می شود؛ در حالی که رفتار شیمیایی منجر به افزایش قابل توجه میزان ناکس تولیدی می شود. این موضوع به علت میزان کربن دی اکسید بیشتر در دسترس برای تولید ناکس از طریق واکنش $N_2 + CO_2 \leftrightarrow NO + NCO$ و همچنین افزایش نرخ واکنش $HNCO + OH \leftrightarrow NH_2 + CO_2$ و همچنین افزایش نرخ واکنش $HNCO + H \leftrightarrow NO + CH_2$ که منجر به افزایش تولید $HNCO$ گردیده و از طریق واکنش $HNCO + H \leftrightarrow NO + CH_2$ میزان ناکس تولیدی را افزایش می دهد. علاوه بر این با افزایش میزان تزریق مقدار دی اکسید کربن در دسترس جهت انجام واکنش های ذکر شده نیز افزایش می یابد. در مقادیر کسر جرمی بالای تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کننده (کسر جرمی ۷۵ درصدی دی اکسید کربن) علاوه بر کاهش دما، کاهش نیتروژن در دسترس نیز به صورت قابل توجهی بر روی میزان ناکس منتشر شده تاثیرگذار خواهد بود. همچنین در این کسر جرمی از تاثیر شیمیایی تزریق با توجه به کاهش نرخ واکنش $N_2 + CO_2 \leftrightarrow NO + NCO$ به صورت قابل توجهی کاسته می شود. با توجه به نتایج حاصل شده می توان مشاهده کرد که تزریق دی اکسید کربن در مقادیر بالا منجر به کاهش ناکس و در مقادیر پایین منجر به افزایش ناکس می شود.

۴-۳- تاثیر میزان دمای پیش گرمایش بر تزریق دی اکسید کربن در جریان اکسید کننده

یکی از پارامترهای اصلی در دست یابی به احتراق بدون شعله رسیدن دمای مخلوط احتراقی به دمای خوداشتعالی سوخت

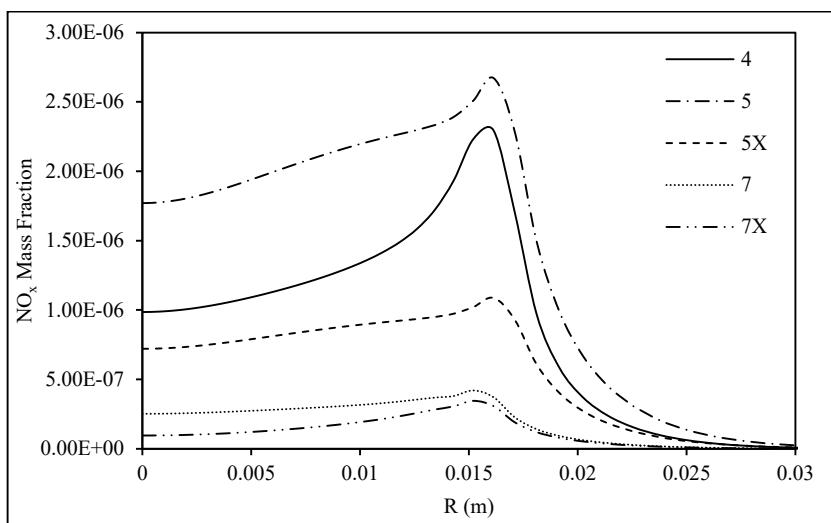
شیمیایی $CO_2 + M \leftrightarrow CO + O + M$ است. در شرایط تزریق دی اکسید کربن به علت دی اکسید کربن موجود بیشتر در مخلوط احتراقی، این واکنش فعال تر شده و منجر به تولید مونوکسید کربن بیشتر می گردد.

شکل ۸ مقایسه اثرات شیمیایی و فیزیکی برای دو حالت تزریق ۲۵ و ۷۵ درصد کسر جرمی دی اکسید کربن درون اکسید کننده بر روی میزان مونوکسید کربن تولیدی را نشان می دهد. همان طور که در این کاترورها مشاهده می شود با افزایش میزان تزریق دی اکسید کربن، میزان کربن مونوکسید تولید شده بر اثر تاثیر شیمیایی ناشی از تزریق دی اکسید کربن به صورت قابل توجهی افزایش می یابد (مقدار بیشینه کربن مونوکسید تولید شده در این شرایط از ۰/۰۵ در حالت تزریق ۲۵ درصد کیسر جرمی دی اکسید کربن به ۰/۰۷۲ در حالت تزریق ۵۰ درصد کیسر جرمی دی اکسید کربن افزایش می یابد). آلاینده دیگری که در فرآیندهای احتراقی بسیار مورد توجه قرار می گیرد، ناکس است. در شکل ۹ تاثیرات شیمیایی و فیزیکی ناشی از تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کننده بر روی میزان آلاینده ناکس در فاصله ۹۰ سانتی متری از ورودی سوخت و اکسید کننده نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، تزریق مقادیر بالای دی اکسید کربن درون اکسید کننده به صورت فیزیکی و شیمیایی منجر به کاهش کسر جرمی ناکس می شود. این در حالی است که تزریق دی اکسید کربن معادل ۲۵ درصدی کسر جرمی اکسید کننده رفتار فیزیکی و شیمیایی متفاوتی از خود نشان می دهد. در این حالت تاثیر فیزیکی تزریق منجر به کاهش میزان ناکس تولید شده به علت کاهش بیشینه دمای فرآیند احتراق و



شکل ۸: مقایسه اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق مقادیر مختلف دی اکسید کربن درون اکسیدکننده بر روی انتشار مونوکسید کربن (الف) تزریق ۲۵ درصدی دی اکسید کربن ، (ب) تزریق ۷۵ درصدی دی اکسید کربن

Fig .8: comparison btween physical and chemical effects of different values of CO₂ injection on the CO emission a) 25% injection of CO₂, b) 75% injection of CO₂

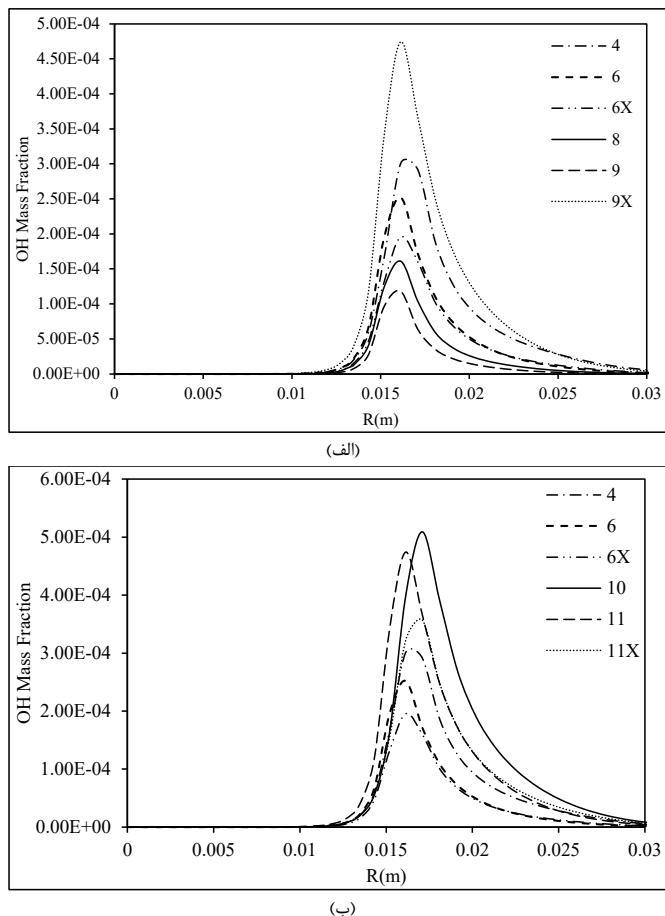


شکل ۹: اثر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن بر کسر جرمی ناکس در فاصله ۹۰ سانتی متری از ابتدای مشعل

Fig. 9: Chemical and physical effect of CO₂ injection on the NO_x mass fraction in 90cm from burner inlet

احتراقی مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است تا بتوان با استفاده از بازچرخش محصولات احتراقی درون محفظه احتراق، بخشی از پیش‌گرمایش را تامین کرده و بدین ترتیب جهت

می‌باشد. در سال‌های اخیر به منظور افزایش کاربردهای این رژیم احتراقی در فرآیندهای احتراق صنعتی مختلف بر روی میزان پیش‌گرمایش اکسیدکننده ورودی با استفاده از محصولات داغ



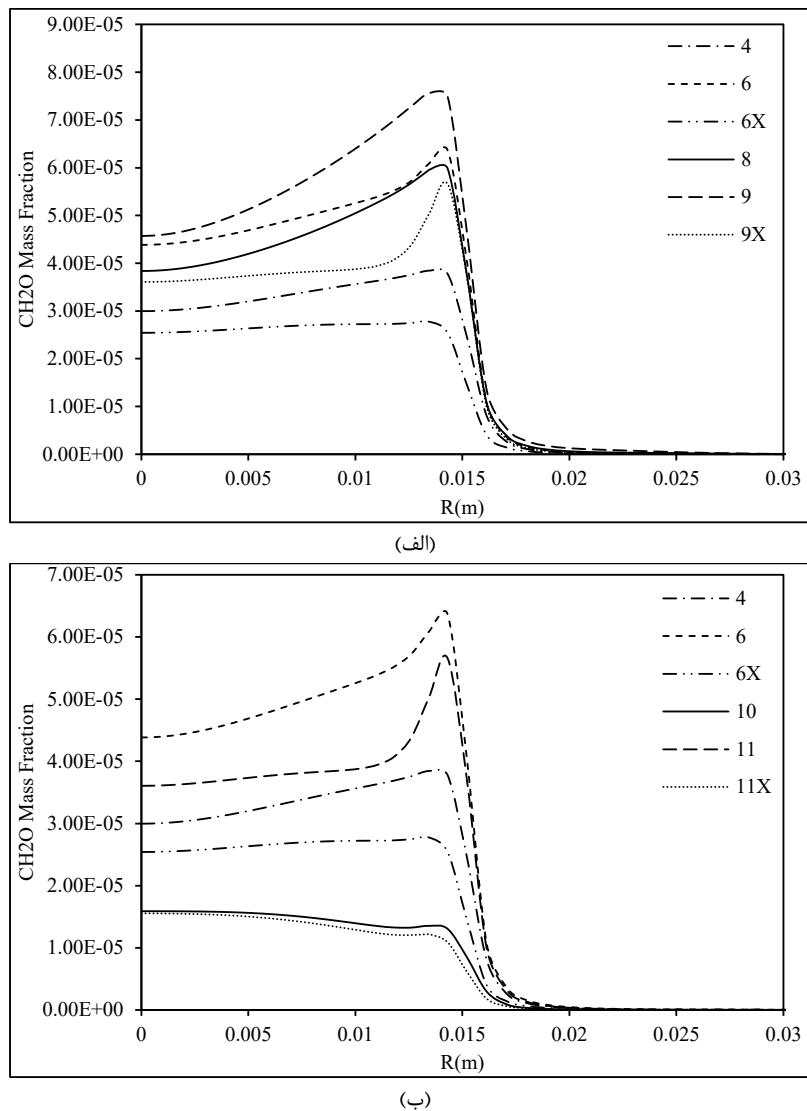
شکل ۱۰: اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کننده بر کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل تشکیل شده در فاصله ۹۰ سانتی متری مشعل برای دماهای پیش گرمایش مختلف، (الف) مقایسه دمای ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ کلوین، (ب) مقایسه دمای ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین

Fig. 10: Chemical and physical effects of CO_2 injection into oxidizer on the OH mass fraction in 90cm from burner inlet for different preheating temperature, a) comparison between 1100 K and 1300 K, b) comparison between 1300 K and 1500 K

به بررسی تاثیر میزان دمای پیش گرمایش اکسید کننده روی اثرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کننده پرداخته شده است. در شکل ۱۰ تغییرات غلظت رادیکال هیدروکسیل در فاصله ۹۰ سانتی متری از ورودی مشعل برای دو دمای ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ کلوین با شرایط دمای ورودی ۱۲۰۰ کلوین در شرایط تزریق ۵ درصد جرمی اکسید کننده برابر با دی اکسید کربن و گونه مجازی X نشان داده است. میزان کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل با افزایش دمای پیش گرمایش افزایش می یابد. افزایش دما منجر به تجزیه بیشتر H_2O از طریق واکنش $\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$ گردیده که این موضوع سبب افزایش میزان رادیکال هیدروکسیل تولیدی می شود. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که با افزایش دمای پیش گرمایش از ۱۳۰۰ کلوین به ۱۵۰۰ کلوین بیشینه تاثیر فیزیکی تزریق دی اکسید کربن از ۶۸ درصد کاهش غلظت این رادیکال

دست یابی به احتراق بدون شعله دمای اکسید کننده پایین تری لازم باشد. از طرفی در کاربردهای دما بالا نیز لازم است تا مقادیر پیش گرمایش به صورت قابل توجهی بالا باشد تا بتوان به متوسط دمایی مورد نظر با استفاده از احتراق بدون شعله دست پیدا کرد. از این رو یکی از پارامترهای اساسی که در احتراق بدون شعله بررسی می شود میزان دمای پیش گرمایش است. این دما می تواند بر روی اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کننده نیز اثرگذار باشد که در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۳-۱- تاثیر میزان دمای پیش گرمایش اکسید کننده بر اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن روی ساختار شعله با استفاده از سه دمای پیش گرمایش ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین



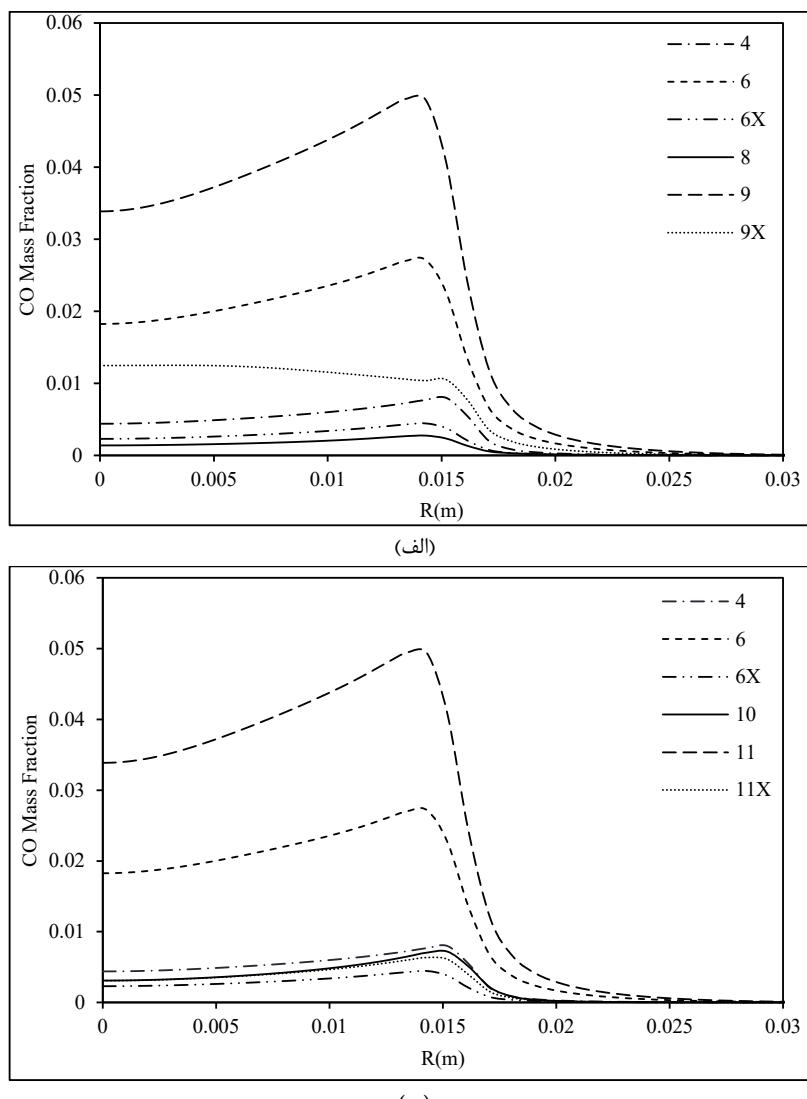
شکل ۱۱: اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن درون اکسیدکننده بر کسر جرمی رادیکال فرمالدهید تشکیل شده در فاصله ۹۰ سانتی متری مشعل برای دماهای پیش گرمایش مختلف، (الف) مقایسه دمای ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ کلوین، (ب) مقایسه دمای ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین

Fig. 11: Chemical and physical effects of CO_2 injection into oxidizer on the CH_2O mass fraction in 90cm from burner inlet for different preheating temperature, a) comparison between 1100 K and 1300 K, b) comparison between 1300 K and 1500 K

با نتایج بدست آمده با افزایش دما تاثیر شیمیایی حضور دی اکسید کربن در واکنشها منجر به افزایش میزان فرمالدهید (CH_2O) آزاد شده می گردد که این موضوع به علت افزایش نرخ واکنش $\text{CH}_2(\text{s}) + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{CH}_2\text{O}$ با افزایش دمای پیش گرمایش می باشد که افزایش میزان فرمالدهید منتشر شده را منجر خواهد شد. علاوه بر این می توان مشاهده کرد که با افزایش دما از تاثیر فیزیکی تزریق دی اکسید کربن درون اکسیدکننده کاسته می شود که این موضوع به علت کاهش در نرخ واکنش های موثر در تولید رادیکال فرمالدهید می باشد.

به ۴۳ درصد کاهش، تغییر می یابد. در این شرایط تاثیر شیمیایی تزریق دی اکسید کربن تغییرات زیادی بر روی بیشینه مقدار رادیکال هیدروکسیل نداشته و در این شرایط مقدار OH از ۲۸ درصد کاهش به ۲۷ درصد تغییر پیدا می کند.

شکل ۱۱ تغییرات غلظت رادیکال فرمالدهید در دو دمای ۱۱۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین در شرایط تزریق ۵۰ درصد گونه X و دی اکسید کربن را با دمای ۱۳۰۰ کلوین نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش دمای پیش گرمایش نرخ کلی آزادسازی حرارت به علت افزایش میزان فرمالدهید منتشر شده افزایش می یابد. مطابق



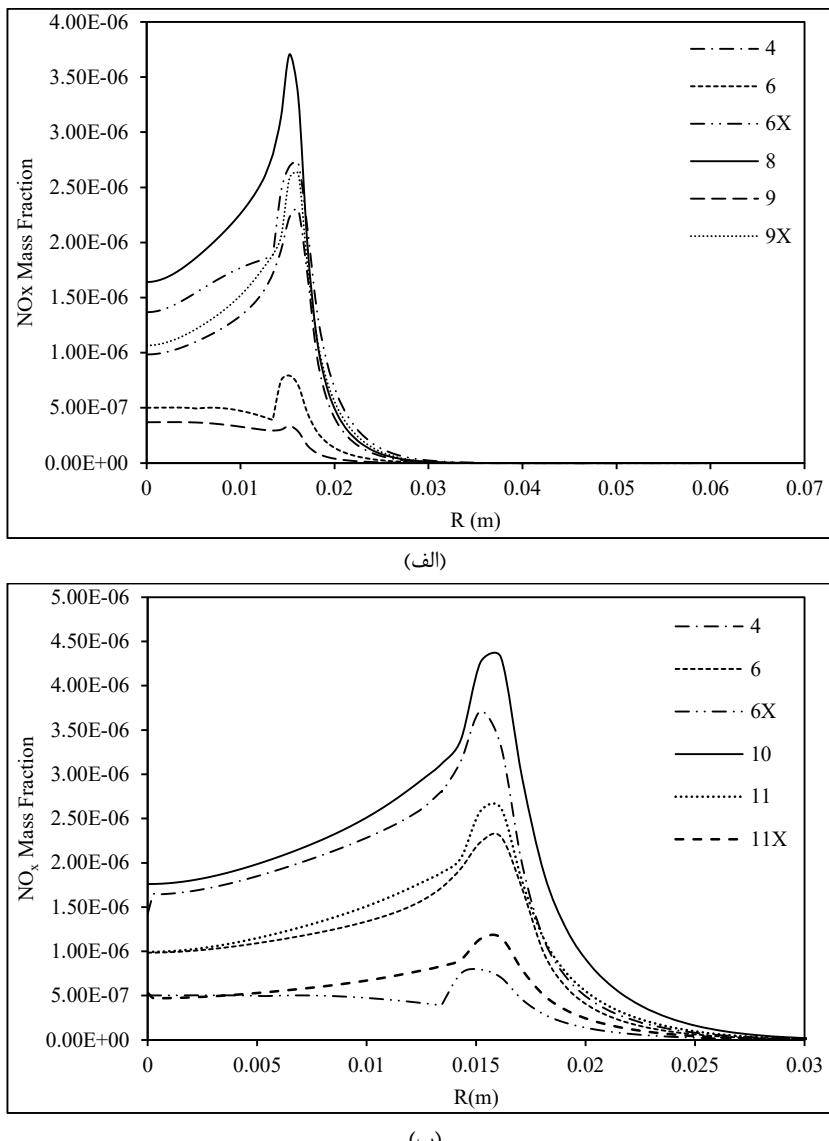
شکل ۱۲: اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن درون اکسیدکننده بر کسر جرمی کربن مونوکسید تشکیل شده در فاصله ۹۰ سانتی متری مشعل برای دماهی پیش گرمایش مختلف، (الف) مقایسه دمای ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ کلوین، (ب) مقایسه دمای ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین

Fig. 12: Chemical and physical effects of CO₂ injection into oxidizer on the CO mass fraction in 90cm from burner inlet for different preheating temperature, a) comparison between 1100 K and 1300 K, b) comparison between 1300 K and

شیمیایی منجر به افزایش ۴۵٪ در بیشینه مقدار مونوکسید کربن تولیدی می‌شود در حالی که در دمای ۱۱۰۰ کلوین تاثیر شیمیایی تزریق منجر به افزایش ۸٪ در کسر جرمی مونوکسید کربن تولیدی می‌شود. علت این امر افزایش نرخ واکنش و فعالیت واکنش‌هایی است که در آن‌ها دی اکسید کربن تجزیه شده و به مونوکسید کربن تبدیل می‌گردد که مهمترین واکنش با بررسی نرخ واکنش‌های شیمیایی مقایسه با تزریق شیمیایی تاثیر بسیار کمتری داشته و با توجه به نتایج حاصل شده این موضوع مستقل از دمای پیش گرمایش ورودی است.

۲-۳-۴- تاثیر میزان دمای پیش گرمایش اکسیدکننده بر اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن روی انتشار آلینده مونوکسید کربن و ناکس

شکل ۱۲ مقایسه تغییرات کسر جرمی مونوکسید کربن در فاصله ۹۰ سانتی متری از ورودی مشعل به ازای دمای ۱۱۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش دمای ورودی تاثیر شیمیایی تزریق دی اکسید کربن به صورت قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. این تاثیر به گونه‌ای است که در دمای ۱۵۰۰ کلوین اثرات شیمیایی حاصل از حضور دی اکسید کربن در واکنش‌های



شکل ۱۳: اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کرنده بر کسر جرمی ناکس تشکیل شده در فاصله ۹۰ سانتی متری مشعل برای دماهی پیش گرمایش مختلف، (الف) مقایسه دمای ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ کلوین، (ب) مقایسه دمای ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین

Fig. 13: Chemical and physical effects of CO₂ injection into oxidizer on the NO_x mass fraction in 90cm from burner inlet for different preheating temperature, a) comparison between 1100 K and 1300 K, b) comparison between 1300 K and 1500 K

حضور دی اکسید کربن در واکنش $N_2 + CO_2 \leftrightarrow NO + NCO$ و در نتیجه افزایش میزان آلاینده ناکس منتشر شده با وجود کاهش دمای بیشینه احتراقی می شود. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می شود که تزریق دی اکسید کربن منجر به کاهش توزیع میزان ناکس تا نصف میزان ناکس در حالت تزریق نیتروژن می شود. در شرایط تزریق نیتروژن علاوه بر دمای بالای احتراق و انتشار ناکس از طریق مکانیزم حرارتی، میزان نیتروژن در دسترس بیشتر نیز عاملی برای افزایش ناکس تولیدی است.

شکل ۱۳ تاثیر میزان دمای پیش گرمایش مخلوط ورودی بر آلاینده ناکس را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش دمای ورودی میزان آلاینده ناکس منتشر شده نیز افزایش پیدا می کند. علاوه بر این تاثیر فیزیکی تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کرنده به علت کاهش بیشینه دمای احتراق منجر به کاهش میزان آلاینده ناکس تولید شده به صورت قابل توجه می گردد. برخلاف تاثیر فیزیکی، تاثیر شیمیایی تزریق دی اکسید کربن منجر به افزایش میزان ناکس منتشر شده می گردد. این موضوع به علت

۵- جمع‌بندی

تزریق دی‌اکسید کربن در شرایط تزریق مقادیر بالاتر آن درون اکسیدکننده می‌باشد.

ج- با افزایش دمای پیش‌گرمایش اکسیدکننده میزان تاثیر شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن درون جریان اکسیدکننده افزایش یافته و میزان مونوکسید کربن تولید شده به صورت قابل توجهی تغییر می‌کند. با افزایش دمای پیش‌گرمایش نقش واکنش‌های تجزیه دی‌اکسید کربن به مونوکسید کربن به خصوص واکنش $\text{CO}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{CO} + \text{O} + \text{M}$ به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد.

د- افزایش دمای پیش‌گرمایش اکسیدکننده منجر به تغییر در مقادیر رادیکال‌های هیدروکسیل و فرمالدهید می‌شود. در این شرایط غلظت رادیکال هیدروکسیل افزایش پیدا کرده و به صورت یکنواخت‌تری است که این بیانگر توزیع حرارت یکنواخت‌تر می‌باشد.

مراجع

- [1] G.G. Szego, Experimental and numerical investigation of a parallel jet MILD combustion burner system in a laboratory-scale furnace, 2010.
- [2] 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.
- [3] H. Tsuji, A.K. Gupta, T. Hasegawa, M. Katsuki, K. Kishimoto, M. Morita, High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction, CRC press, 2002.
- [4] A. Cavaliere, M. de Joannon, Mild combustion, *Progress in Energy and Combustion science*, 30(4) (2004) 329-366.
- [5] G. Szegö, B. Dally, G. Nathan, Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system, *Combustion and Flame*, 156(2) (2009) 429-438.
- [6] M.M. Maroto-Valer, Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO₂) Capture and Storage Technology: Carbon Dioxide (CO₂) Storage and Utilisation, Elsevier, 2010.
- [7] Y. Tu, K. Su, H. Liu, S. Chen, Z. Liu, C. Zheng, Physical and chemical effects of CO₂ addition on

با توجه به چالش گرمای جهانی در سال‌های اخیر و انجام مطالعات گسترده بر روی روش‌های مختلف به منظور کاهش گازهای انتشار دی‌اکسید کربن به عنوان اصلی ترین گاز گلخانه‌ای، در مطالعه حاضر به بررسی عددی تاثیر تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده در احتراق متان/هیدروژن-هوای بدون شعله پرداخته شد. بدین منظور از مشعل احتراقی جی‌اچ‌سی جهت انجام بررسی‌ها استفاده گردیده و تاثیر تزریق مقادیر مختلف دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. با توجه به پیش‌گرمایش مخلوط احتراقی در احتراق بدون شعله تا دمای خوداشتعالی، اثر دمای پیش‌گرمایش به عنوان یکی از پارامترهای اصلی در این احتراق نیز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در مطالعه حاضر تغییرات رادیکال هیدروکسیل به منظور بررسی تاثیر تزریق دی‌اکسید کربن در شرایط مختلف مورد بررسی بر روی میزان نرخ واکنش‌ها به عنوان یکی از اصلی‌ترین کمیت‌های مورد بررسی در فرآیند احتراق مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات مربوط به رادیکال فرمالدهید نیز به منظور بررسی تغییرات میزان گرمای آزاد شده در شرایط مختلف مورد بررسی در مطالعه حاضر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین نتایج مربوط به اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن بر روی آلاینده‌های کربن مونوکسید و ناکس تحت شرایط تزریق مقادیر مختلف دی‌اکسید کربن و همچنین بررسی اثر پیش‌گرمایش بر روی این تزریق مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. مهمترین نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر عبارتند از:

الف- افزایش میزان دی‌اکسید کربن تزریق شده منجر به کاهش میزان نرخ واکنش‌ها از طریق کاهش غلظت رادیکال هیدروکسیل می‌گردد. علاوه‌بر این با افزایش مقادیر تزریق به علت کاهش بیشینه دما میزان آلاینده ناکس تولید شده نیز به صورت قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.

ب- واکنش‌های تجزیه دی‌اکسید کربن به مونوکسید کربن در سینتیک‌های شیمیایی در شرایط تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده اهمیت بسیار بالایی در پیش‌بینی میزان حرارت آزاد شده و توزیع آلاینده‌های کربن مونوکسید و ناکس دارد. این اهمیت با افزایش میزان دی‌اکسید کربن تزریق شده به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد که این موضوع به علت افزایش اهمیت تاثیر شیمیایی

- in methane oxy-fuel combustion, International Journal of Heat and Mass Transfer, 86 (2015) 622-628.
- [15] F.C. Christo, B.B. Dally, Modeling turbulent reacting jets issuing into a hot and diluted coflow, Combustion and flame, 142(1-2) (2005) 117-129.
- [16] B.B. Dally, A. Karpetis, R. Barlow, Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow, Proceedings of the combustion institute, 29(1) (2002) 1147-1154.
- [17] J. Mi, P. Li, B.B. Dally, R.A. Craig, Importance of initial momentum rate and air-fuel premixing on moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion in a recuperative furnace, Energy & Fuels, 23(11) (2009) 5349-5356.
- [18] A. Mardani, S. Tabejamaat, M. Ghamari, Numerical study of influence of molecular diffusion in the Mild combustion regime, Combustion Theory and Modelling, 14(5) (2010) 747-774.
- [19] P. Cumber, M. Fairweather, H. Ledin, Application of wide band radiation models to non-homogeneous combustion systems, International Journal of Heat and Mass Transfer, 41(11) (1998) 1573-1584.
- [20] C. Bowman, R. Hanson, W. Gardiner, V. Lissianski, M. Frenklach, M. Goldenberg, G. Smith, GRI-Mech 2. 11: An Optimized Detailed Chemical Reaction Mechanism for Methane Combustion and NO Formation and Reburning, NASA, (19980005146) (1997).
- CH₄/H₂ flames on a Jet in Hot Coflow (JHC) burner, Energy & Fuels, 30(2) (2016) 1390-1399.
- [8] 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.
- [9] L. Wang, Z. Liu, S. Chen, C. Zheng, J. Li, Physical and chemical effects of CO₂ and H₂O additives on counterflow diffusion flame burning methane, Energy & fuels, 27(12) (2013) 7602-7611.
- [10] S. Chen, H. Liu, C. Zheng, Methane combustion in MILD oxyfuel regime: Influences of dilution atmosphere in co-flow configuration, Energy, 121 (2017) 159-175.
- [11] Z. Mei, J. Mi, F. Wang, C. Zheng, Dimensions of CH₄-jet flame in hot O₂/CO₂ coflow, Energy & Fuels, 26(6) (2012) 3257-3266.
- [12] J. Park, J.S. Park, H.P. Kim, J.S. Kim, S.C. Kim, J.G. Choi, H.C. Cho, K.W. Cho, H.S. Park, NO emission behavior in oxy-fuel combustion recirculated with carbon dioxide, Energy & fuels, 21(1) (2007) 121-129.
- [13] N. Gascoin, Q. Yang, K. Chetehouna, Thermal effects of CO₂ on the NO_x formation behavior in the CH₄ diffusion combustion system, Applied Thermal Engineering, 110 (2017) 144-149.
- [14] Y. Song, C. Zou, Y. He, C. Zheng, The chemical mechanism of the effect of CO₂ on the temperature