



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

اسماعیل ابراهیمی فردویی، کیومرث مظاهری\*

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 آلایند

**خلاصه:** هدف از مطالعه حاضر شبیه سازی عددی مشعل بدون شعله همراه با تزریق دی اکسید کربن درون جریان اکسیدکننده با استفاده از نرم افزار متن باز این فوم است. همچنین اثر مقادیر دمایی پیش گرمایش اکسیدکننده در آن مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور انجام شبیه سازی ها از مدل احتراقی پی.آ.اس.آر، مدل آشفنگی کا-اپسیلون استاندارد با ضرایب اصلاح شده و همچنین مدل تشعشعی فاز گسسته همراه با محاسبه ضرایب جذب و گسیل با استفاده از مدل دلبویو.اس.جی.ام با ضرایب گاز غیرخاکستری استفاده شده است. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر نشان دهنده آن است که اثرات فیزیکی ناشی از تزریق دی اکسید کربن منجر به کاهش میزان آزادسازی حرارت و میزان کربن مونوکسید تولید شده می گردد در حالی که اثرات شیمیایی این تزریق منجر به افزایش قابل توجهی در این مقادیر می شود. 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 ۰/۰۷۲ می شود. همچنین با افزایش دمای اکسیدکننده بر تاثیر شیمیایی تزریق بر روی ساختار شعله و انتشار آلایند مونوکسید کربن افزوده می شود. همچنین تاثیر شیمیایی تزریق دی اکسید کربن بر روی تولید آلایند ناکس به صورتی است که با افزایش دما منجر به افزایش میزان ناکس منتشر شده می شود.

### ۱- مقدمه

جداسازی و کاهش انتشار دی اکسید کربن به عنوان اصلی ترین گاز گلخانه ای، استفاده از احتراق سوخت-اکسیژن و استفاده از حلال های شیمیایی می باشد که استفاده از حلال ها در احتراق سوخت-هوا مورد توجه قرار دارد [۶]. در این روش ها دی اکسید کربن از محصولات احتراقی جدا گردیده و به منظور به کارگیری در سایر کاربردها مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از موارد استفاده از دی اکسید کربن بازچرخش آن به درون محفظه احتراق از طریق ترکیب آن با اکسیدکننده می باشد [۶ و ۷]. اضافه نمودن دی اکسید کربن درون اکسیدکننده و جایگزینی آن با نیتروژن با توجه به تفاوت های فیزیکی آن ها با یکدیگر و همچنین مشارکت دی اکسید کربن در واکنش های شیمیایی منجر به تفاوت های اساسی در فرآیند احتراق می گردد [۸]. از این رو مطالعات گسترده ای 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 پیش آمیخته جریان

احتراق بدون شعله یکی از فرآیندهای نوین احتراقی است که در سال های اخیر به عنوان یکی از بهترین روش ها جهت کاهش آلایند ناکس همزمان با افزایش بازدهی سیستم های 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 می باشد [۵-۲]. عمده محصول فرآیند احتراق سوخت-هوا که به منظور بازچرخش جهت دستیابی به احتراق بدون شعله مورد استفاده قرار می گیرد، نیتروژن می باشد که گازی خنثی بوده و در واکنش های شیمیایی شرکت نمی کند. در سال های اخیر با توجه به مسئله گرمایش جهانی در اثر انتشار گازهای گلخانه ای، کاهش انتشار این گازها مورد توجه محققین قرار گرفته است. دو روش عمده جهت

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: kiumars@moares.ac.ir



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. علاوه‌براین 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 بخار آب 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-هوای موجود با سیستم‌های متان- $O_2/CO_2$  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 متمرکز 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 جی.اچ.سی

متقابل<sup>۱</sup> پرداختند. در این بررسی مشاهده شد که اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن منجر به کاهش دمای بیشینه شعله می‌شود. علاوه بر این نتایج بدست آمده از این بررسی نشان‌دهنده 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.

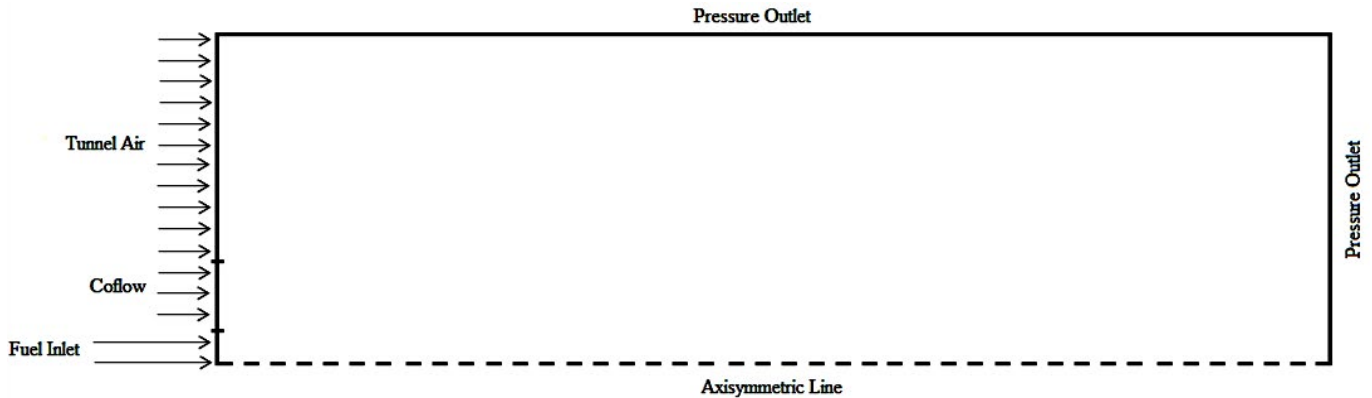
تو و همکاران [۸] به بررسی اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن درون جریان محصولات داغ احتراقی با استفاده از مشعل جی.اچ.سی<sup>۲</sup> با ورودی اصلاح شده در احتراق سوخت-اکسیژن بدون شعله پرداختند. در این مطالعه محدوده حل عددی با توجه به مطالعه صورت گرفته در مرجع [۱۱] تنها شامل ورودی سوخت و محصولات بازچرخش یافته احتراقی بود. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می‌دهند که جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن سبب می‌شود تا اشتعال در احتراق سوخت-اکسیژن با تاخیر مواجه شود؛ همچنین این تزریق منجر می‌شود تا توزیع دمای یکنواخت‌تری نسبت به حالت احتراق سوخت-هوای 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<sup>۳</sup> 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.

### ۲-۲- 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 مقادیر 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.

### ۲-۳- روش حل عددی

از نرم‌افزار متن باز این فوم به منظور انجام شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است که در آن معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس در شرایط آشفته حل می‌گردند. جهت مدل‌سازی آشفتگی از مدل کا-اپسیلون<sup>۱</sup> استاندارد همراه با اصلاح ضریب  $C_{\epsilon_1}$  از ۱/۴۴ 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. علاوه بر این اثر تغییرات دمای پیش‌گرمایش اکسیدکننده نیز بر روی اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

### ۲-۲- شرایط حل عددی

#### ۲-۱- 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 ۴/۲۵ میلی‌متر وارد مشعل می‌شود. به منظور دستیابی به احتراق بدون شعله از جریان محصولات داغ احتراقی با قطر خارجی ۷۷/۷۵ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین در بررسی تجربی 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

1 k-ε

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

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

ردیف	دمای محصولات احتراق (K)	کسر جرمی گونه‌های محصولات احتراق (درصد جرمی)	کسر جرمی هوای تونل باد (درصد جرمی)
شرایط مرزی حاکم بر مسئله جهت اعتبارسنجی حلگر و شرایط حل عددی انتخاب شده (برای سه کسر جرمی اکسیژن متفاوت ۰.۳، ۰.۶ و ۰.۹ درصد)			
۱	۱۳۰۰	$O_2=3, CO_2=5/5, H_2O=6/5, N_2=85, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=77, XCO_2=0$
۲	۱۳۰۰	$O_2=6, CO_2=5/5, H_2O=6/5, N_2=82, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=77, XCO_2=0$
۳	۱۳۰۰	$O_2=9, CO_2=5/5, H_2O=6/5, N_2=79, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=77, XCO_2=0$
تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق مقادیر مختلف دی‌اکسید کربن (ردیف ۴ مربوط به شرایط استفاده از نیتروژن خالص به همراه ۳ درصد کسر جرمی $O_2$ در سمت اکسیدکننده می‌باشد. ردیف‌های ۵، ۶ و ۷ نیز به ترتیب مربوط به جایگزینی ۰.۲۵، ۰.۵ و ۰.۷۵ درصد از نیتروژن با $CO_2$ می‌باشد. ردیف‌های ۵X، 6X، 7X نیز مربوط به جایگزینی ۰.۲۵، ۰.۵ و ۰.۷۵ درصد از $N_2$ با گونه مجازی X در سمت اکسیدکننده می‌باشد.)			
۴	۱۳۰۰	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=97, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=77, XCO_2=0$
۵	۱۳۰۰	$O_2=3, CO_2=25, H_2O=0, N_2=72, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=25, H_2O=0, N_2=52, XCO_2=0$
۵X	۱۳۰۰	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=72, XCO_2=25$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=52, XCO_2=25$
۶	۱۳۰۰	$O_2=3, CO_2=50, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=50, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=0$
۶X	۱۳۰۰	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=50$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=50$
۷	۱۳۰۰	$O_2=3, CO_2=75, H_2O=0, N_2=22, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=75, H_2O=0, N_2=2, XCO_2=0$
۷X	۱۳۰۰	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=22, XCO_2=75$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=2, XCO_2=75$
تاثیر مقادیر پیش‌گرمایش 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 دمای پیش‌گرمایش ۱۱۰۰ کلون می‌باشد. ردیف‌های ۹ و ۹XT نیز به ترتیب مربوط به شرایط جایگزینی ۰.۵ درصد کسر جرمی نیتروژن با $CO_2$ در جریان اکسیدکننده می‌باشد. سه ردیف بعد شرایطی کاملا مشابه با سه ردیف توضیح داده شده داشته و تنها دمای پیش‌گرمایش در آن‌ها ۱۵۰۰ کلون است)			
۸	۱۱۰۰	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=97, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=50, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=0$
۹	۱۱۰۰	$O_2=3, CO_2=50, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=50, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=0$
۹XT	۱۱۰۰	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=50$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=2, XCO_2=50$
۱۰	۱۵۰۰	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=97, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=50, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=0$
۱۱	۱۵۰۰	$O_2=3, CO_2=50, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=0$	$O_2=23, CO_2=50, H_2O=0, N_2=27, XCO_2=0$
۱۱XT	۱۵۰۰	$O_2=3, CO_2=0, H_2O=0, N_2=47, XCO_2=50$	$O_2=23, CO_2=0, H_2O=0, N_2=2, XCO_2=50$

جدول ۲ ضرایب مربوط به شرایط تشعشعی گاز غیر خاکستری

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

میزان تزریق CO <sub>2</sub>	طول موج (میکرومتر μm)					
	۰/۰-	۲/۵-	۳/۰-	۴/۰-	۵/۰-	۹/۰-
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 گرما از فرآیند 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 تزریق 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 تزریق گونه مجازی X با حالت تزریق نیتروژن خالص بیانگر تاثیر فیزیکی ناشی از جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن می‌باشد، در حالی که مقایسه میان نتایج بدست آمده از تزریق دی‌اکسید کربن با گونه مجازی X بیانگر تاثیر شیمیایی این تزریق است.

#### ۴- نتایج

۴-۱- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی حلگر مورد استفاده

به‌منظور انجام شبیه‌سازی عددی از شبکه کاملاً ساختار یافته

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

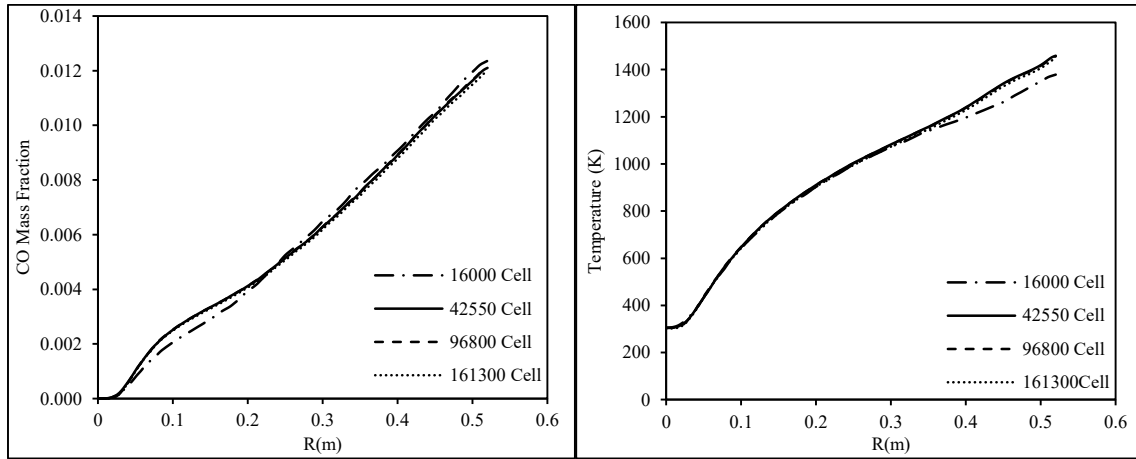
یکی از موضوعاتی که در شبیه‌سازی عددی جریان‌های واکنشی از اهمیت بالایی برخوردار است، مدل‌سازی تشعشع گازهای حاصل از فرآیند احتراق می‌باشد. بررسی‌ها انجام شده بر روی مشعل بدون شعله مورد مطالعه نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی آن می‌توان از مدل‌سازی تشعشع صرف‌نظر کرد. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر از طرفی اثر تزریق دی‌اکسید کربن به‌صورت 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 تشعشعی فاز گسسته جهت انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. در محاسبه ضرایب جذب و گسیل از مدل متوسط‌گیری شده گازهای غیرخاکستری با شش پهنای باند به‌صورت جدول ۲ مطابق با مطالعه صورت گرفته توسط کامبر و همکاران [۱۹] استفاده شده است. همچنین از سینتیک شیمیایی GRI 2.11 با توجه 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<sup>۳</sup> به منظور بر طرف کردن کوپلینگ میان سرعت و فشار مورد استفاده قرار گرفته است. به‌منظور گسسته‌سازی ترم‌های جابه‌جایی از روش کوئیک<sup>۴</sup> 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 به میزان کمتر از ۱ کلوین و ۰/۱ متر بر ثانیه پس از یک دهم ثانیه می‌باشد.

#### ۳- روش بررسی تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن

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

- 1 Partially Stirred Reactor (PaSR)
- 2 ReactingFOAM
- 3 PIMPLE
- 4 QUICK



(ب)

شکل ۲: استقلال نتایج از شبکه عددی ایجاد شده الف) توزیع دما روی خط مرکزی مشعل، ب) توزیع کربن مونوکسید 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**

#### ۴-۲-۱ تاثیر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن بر ساختار شعله

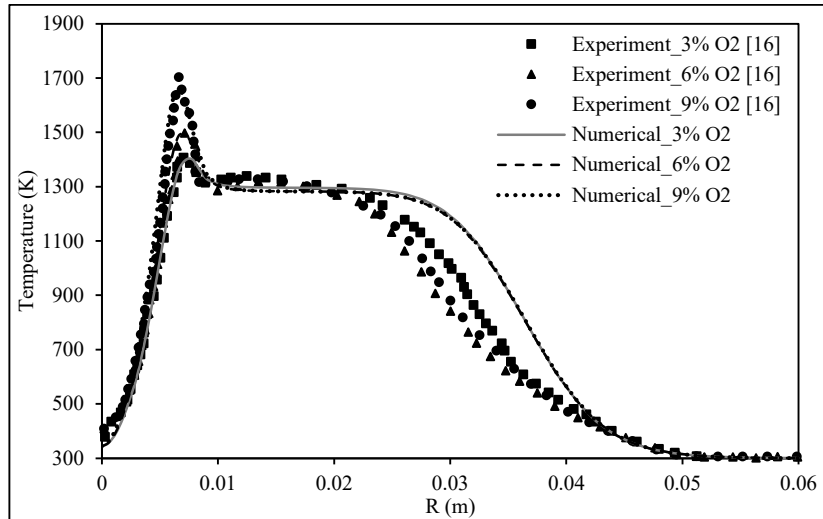
از مهمترین اثرات ناشی از جایگزینی دی اکسید کربن با نیتروژن در جریان اکسیدکننده تغییر ساختار شعله تشکیل شده می باشد. یکی از مهمترین گونه ها در فرآیندهای احتراقی که نقش اساسی در واکنش های شیمیایی و همچنین آزادسازی حرارت ایفا می کند، توزیع رادیکال هیدروکسیل (OH) می باشد. از این رو در در شکل ۴ نتایج تغییرات شعاعی غلظت این رادیکال برای مقادیر تزریق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد جرمی دی اکسید کربن و همچنین گونه مجازی X برای بررسی های انجام گرفته مطابق با جدول ۱ نشان داده شده است.

مطابق با شکل ۴، تاثیر فیزیکی تزریق دی اکسید کربن به گونه ای است که منجر به کاهش قابل توجهی در مقدار بیشینه غلظت رادیکال هیدروکسیل می گردد که این کاهش با افزایش تزریق دی اکسید کربن، افزایش می یابد. کاهش میزان OH تولید شده در این شرایط به علت جذب حرارت بیشتر در شرایط تزریق دی اکسید کربن با توجه به ظرفیت حرارتی بالاتر آن نسبت به نیتروژن می باشد؛ این موضوع سبب می شود تا نرخ واکنش  $OH+H_2 \leftrightarrow H+H_2O$  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 دی اکسید کربن نسبت به نیتروژن) منجر به افزایش غلظت این رادیکال می شود. با توجه به این نتایج می توان گفت که تاثیر فیزیکی تزریق دی اکسید کربن منجر به توزیع

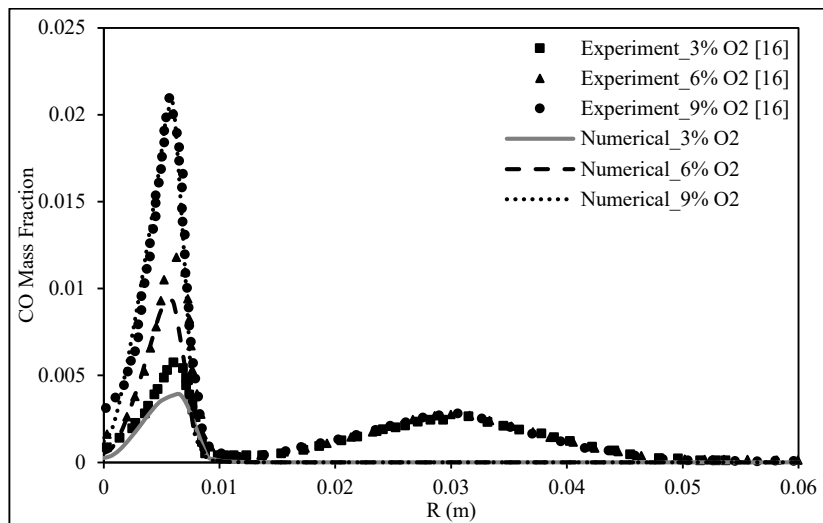
غیریکنواخت استفاده شده است. به منظور بررسی استقلال نتایج بدست آمده از شبکه محاسباتی از چهار شبکه ۱۶۰۰۰، ۴۲۵۵۰، ۹۶۸۰۰ و ۱۶۱۳۰۰ سلولی استفاده شده است. شکل ۲ نمودار تغییرات دما و کربن مونوکسید را بر روی محور مرکزی مشعل بدون شعله مورد بررسی نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، نتایج حاصل از شبکه ۴۲۵۵۰ سلولی انطباق بسیار خوبی با داده های بدست آمده از شبکه های ۹۶۸۰۰ و ۱۶۱۳۰۰ سلولی دارند. از این رو شبکه ۴۲۵۵۰ سلولی به عنوان شبکه ای که در آن نتایج بدست آمده مستقل از شبکه محاسباتی هستند، جهت انجام شبیه سازی ها مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۳ نتایج مربوط به اعتبارسنجی حلگر مورد استفاده جهت شبیه سازی ها آورده شده است. نتایج مربوط به توزیع دما و کسر جرمی گونه های مونوکسید کربن و بخار آب در این شکل مشاهده می شود. در جدول ۳ خطای متوسط مربوط به هر یک از این متغیرها در سه غلظت اکسیژن ۳، ۶ و ۹ درصدی در جریان اکسیدکننده آورده شده است که مطابق با این جدول نتایج بدست آمده تطابق خوبی با داده های تجربی دارند.

#### ۴-۲-۲ تاثیر تزریق مقادیر مختلف دی اکسید کربن در جریان اکسیدکننده

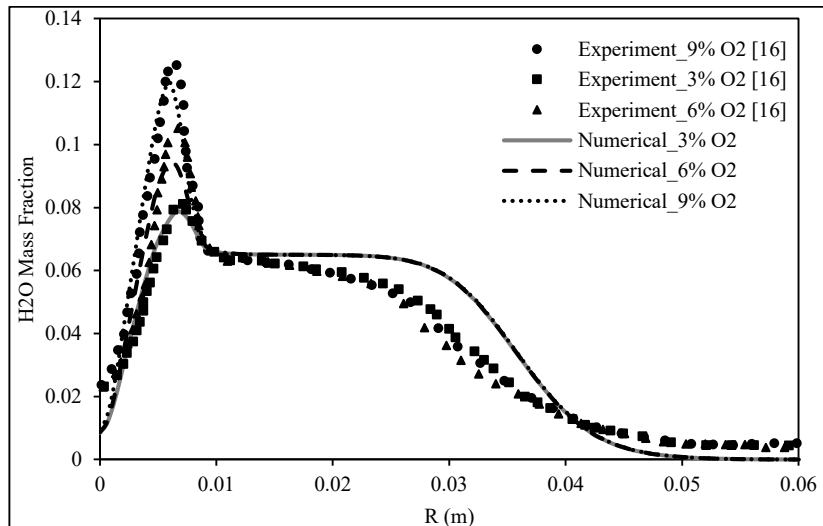
در ابتدا به بررسی تاثیر فیزیکی و شیمیایی مقادیر مختلف تزریق بر روی ساختار شعله و انتشار آلاینده های مونواکسید کربن و ناکس پرداخته می شود.



(الف)



(ب)



(ج)

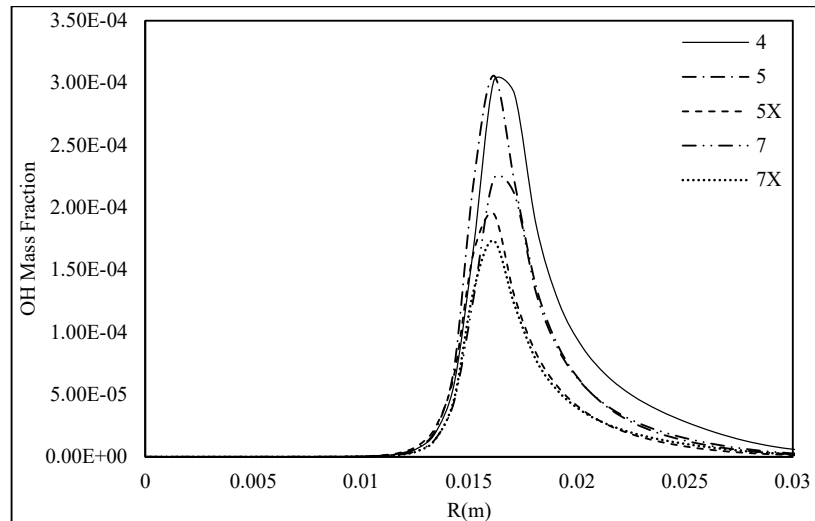
شکل ۳: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی در مقطع عرضی به فاصله ۳۰ سانتی‌متری از ابتدای مشعل، الف) دما، ب) کسر جرمی مونوکسید کربن، ج) کسر جرمی بخار آب

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، دی‌اکسید کربن و بخار آب در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از ورودی‌های مشعل

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

متغیر	درصد خطای متوسط		
	۳% O <sub>2</sub>	۶% O <sub>2</sub>	۹% O <sub>2</sub>
دما	۹	۱۲	۱۱
کسر جرمی CO	۱۱	۱۴	۹
کسر جرمی H <sub>2</sub> O	۱۵	۱۸	۱۴



شکل ۴: اثر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن بر غلظت رادیکال هیدروکسیل در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از ابتدای مشعل

Fig. 4: Chemical and physical effect of CO<sub>2</sub> injection on the OH mass fraction in 90cm from burner inlets

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

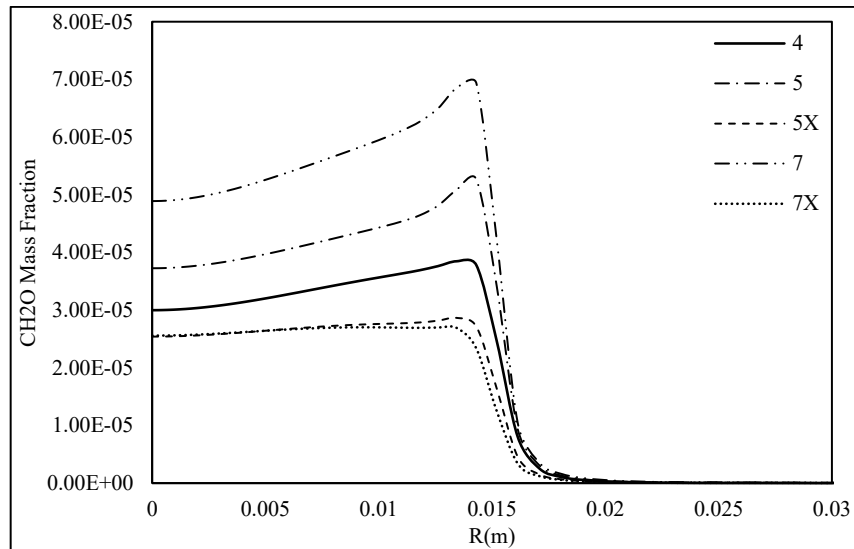
گونه دیگری که در فرآیند احتراق از اهمیت بالایی برخوردار بوده و بیانگر میزان نرخ آزادسازی حرارت ناشی از واکنش‌های شیمیایی می‌باشد، گونه CH<sub>2</sub>O است. تغییرات کسر جرمی این گونه در فاصله ۹۰ سانتی متری از ابتدای مشعل در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با این شکل اثرات فیزیکی تزریق دی‌اکسید کربن در مقطع مورد بررسی به گونه‌ای است که منجر به کاهش غلظت CH<sub>2</sub>O می‌شود؛ در حالی‌که اثرات شیمیایی ناشی از حضور دی‌اکسید کربن در واکنش‌ها منجر به افزایش این گونه و در نتیجه آزادسازی حرارت می‌شود. بررسی‌های انجام شده بر روی واکنش‌های مختلفی که در آن گونه CH<sub>2</sub>O مصرف و یا تولید می‌شوند نشان دهنده آن است که واکنش CH<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> ↔ CO + CH<sub>2</sub>O، واکنش اصلی در اثر شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن بر روی تشکیل فرمالدهید (CH<sub>2</sub>O) می‌باشد.

یکنواخت‌تر رادیکال هیدروکسیل گردیده که این موضوع بیانگر توزیع حرارت یکنواخت‌تر ایجاد شده نیز می‌باشد.

تأثیر شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن به گونه‌ای است که منجر به افزایش کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل از طریق واکنش H + O<sub>2</sub> ↔ O + OH می‌گردد. در واقع شرکت دی‌اکسید کربن در واکنش‌های شیمیایی منجر به آزاد شدن رادیکال H بیشتری گردیده و این موضوع سبب می‌شود تا واکنش بیان شده به منظور تولید رادیکال هیدروکسیل با نرخ بیشتری انجام گردد.

میزان افزایش بیشینه رادیکال هیدروکسیل با افزایش میزان تزریق دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد. مطابق با نتایج بدست آمده برای واکنش‌های مختلف، این موضوع به علت کاهش تأثیر شرکت دی‌اکسید کربن در مقادیر تزریق بالای آن به علت کاهش دمای فرآیند احتراق و در نتیجه تأثیر کمتر آن بر نرخ واکنش‌های بیان شده می‌باشد. مجموع اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن نیز نشان دهنده کاهش میزان رادیکال هیدروکسیل می‌باشد. این موضوع





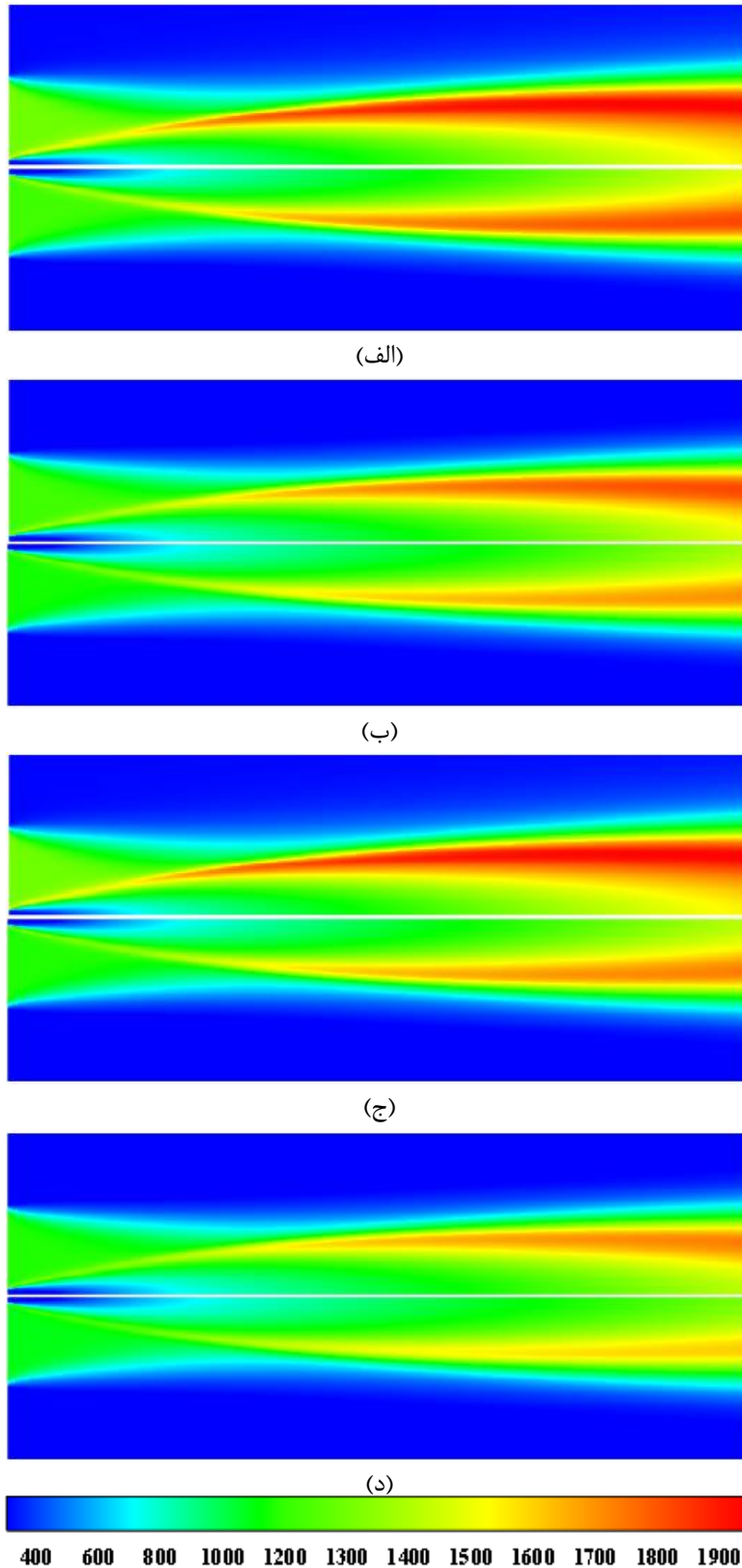
شکل ۵: اثر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن بر کسر جرمی فرمالدهید در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از ابتدای مشعل  
**Fig. 5: Chemical and physical effect of CO<sub>2</sub> injection on the CH<sub>2</sub>O mass fraction in 90cm from burner inlets**

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

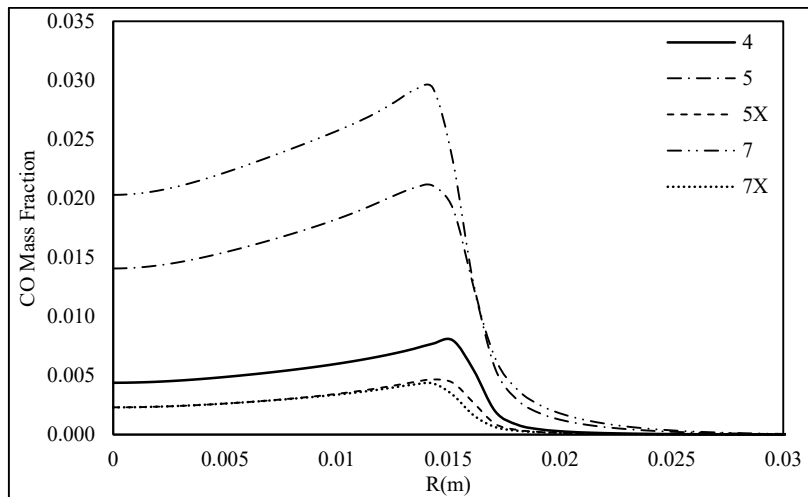
اثر دیگر مهم ناشی از جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن در جریان اکسیدکننده بر روی توزیع آلاینده‌ها می‌باشد. در شکل ۷ اثرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن بر توزیع مونوکسید کربن نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن 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 مونواکسید کربن می‌شود. از طرفی تاثیر شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن منجر به افزایش قابل توجهی در میزان کربن مونوکسید تولید شده می‌گردد. این افزایش از طریق فعال تر شدن 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 5X جدول ۱) است. در شکل ۶ ب نیز تصویر بالا مربوط به تزریق ۲۵ درصد گونه مجازی X (حالت 5X 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 شده 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 7X جدول ۱) است. در شکل ۶ د نیز تصویر بالا مربوط به تزریق ۷۵ درصدی گونه X (حالت 7X 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 CO<sub>2</sub> injection on the temperature distribution a) 25% injection of X virtual species (physical effect of injection), b) 25% injection of CO<sub>2</sub> species (chemical effect of injection), c) 75% injection of X



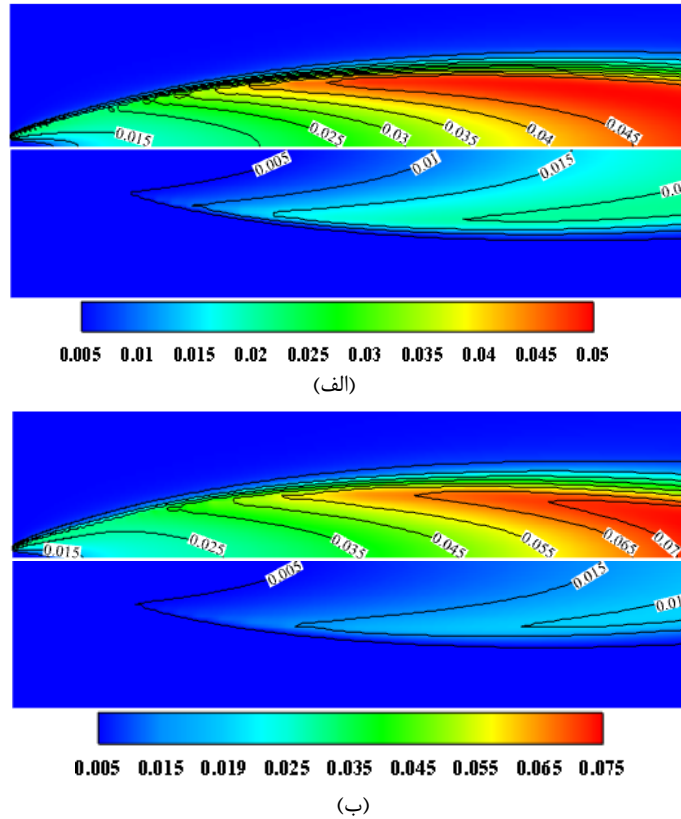
شکل ۷: اثر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن بر کسر جرمی کربن مونوکسید در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از ابتدای مشعل  
 Fig. 7: Chemical and physical effect of CO<sub>2</sub> injection on the CO mass fraction in 90cm from burner inlet

همچنین کاهش میزان نیتروژن در دسترس برای تولید آلاینده ناکس می‌شود؛ در حالی که رفتار شیمیایی منجر به افزایش قابل توجه میزان ناکس تولیدی می‌شود. این موضوع به علت میزان کربن دی‌اکسید بیشتر در دسترس برای تولید ناکس از طریق واکنش  $N_2 + CO_2 \leftrightarrow NO + NCO$  و همچنین افزایش نرخ واکنش  $HNCO + OH \leftrightarrow NH_2 + CO_2$  که منجر به افزایش تولید HNCO گردیده و از طریق واکنش  $HNCO + H \leftrightarrow NO + CH_2$  میزان ناکس تولیدی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این با افزایش میزان تزریق مقدار دی‌اکسید کربن در دسترس جهت انجام واکنش‌های ذکر شده نیز افزایش می‌یابد. در مقادیر کسر جرمی بالای تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده (کسر جرمی ۷۵ درصدی دی‌اکسید 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 می‌شود. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان مشاهده کرد که تزریق دی‌اکسید کربن در مقادیر بالا منجر به کاهش ناکس و در مقادیر پایین منجر به افزایش ناکس می‌شود.

#### ۳-۴- تاثیر میزان دمای پیش‌گرمایش بر تزریق دی‌اکسید کربن در جریان اکسیدکننده

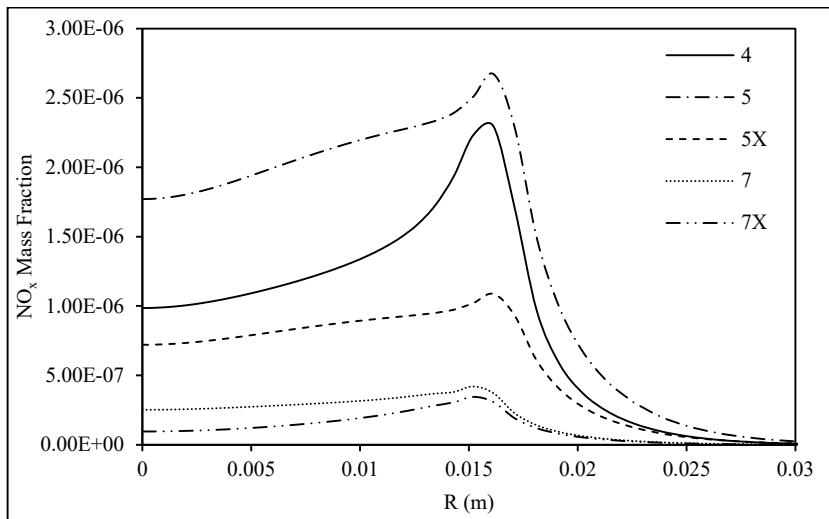
یکی از پارامترهای اصلی در دستیابی به احتراق بدون شعله رسیدن دمای مخلوط احتراقی به دمای خوداشتعالی سوخت

شیمیایی  $CO_2 + M \leftrightarrow CO + O + M$  است. در شرایط تزریق دی‌اکسید کربن به علت دی‌اکسید کربن موجود بیشتر در مخلوط احتراقی، این واکنش فعال‌تر شده و منجر به تولید مونوکسید کربن بیشتر می‌گردد. شکل ۸ مقایسه اثرات شیمیایی و فیزیکی برای دو حالت تزریق ۲۵ و ۷۵ درصد کسر جرمی دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده بر روی میزان مونواکسید کربن تولیدی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این کانتورها مشاهده می‌شود با افزایش میزان تزریق دی‌اکسید کربن، میزان کربن مونوکسید تولید شده بر اثر تاثیر شیمیایی ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد (مقدار بیشینه کربن مونوکسید تولید شده در این شرایط از ۰/۰۵ در حالت تزریق ۲۵ درصد کبیر جرمی دی‌اکسید کربن به ۰/۰۷۲ در حالت تزریق ۵۰ درصد کسر جرمی دی‌اکسید کربن افزایش می‌یابد). آلاینده دیگری که در فرآیندهای احتراقی بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد، ناکس است. در شکل ۹ تاثیرات شیمیایی و فیزیکی ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده بر روی میزان آلاینده ناکس در فاصله ۹۰ سانتی متری از ورودی سوخت و اکسیدکننده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تزریق مقادیر بالای دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده به صورت فیزیکی و شیمیایی منجر به کاهش کسر جرمی ناکس می‌شود. این در حالی است که تزریق دی‌اکسید کربن معادل ۲۵ درصدی کسر جرمی اکسیدکننده رفتار فیزیکی و شیمیایی متفاوتی از خود نشان می‌دهد. 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 دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده بر روی انتشار مونوکسید کربن الف) تزریق ۲۵ درصدی دی‌اکسید کربن، ب) تزریق ۷۵ درصدی دی‌اکسید کربن

Fig. 8: comparison between physical and chemical effects of different values of CO<sub>2</sub> injection on the CO emission a) 25% injection of CO<sub>2</sub>, b) 75% injection of CO<sub>2</sub>

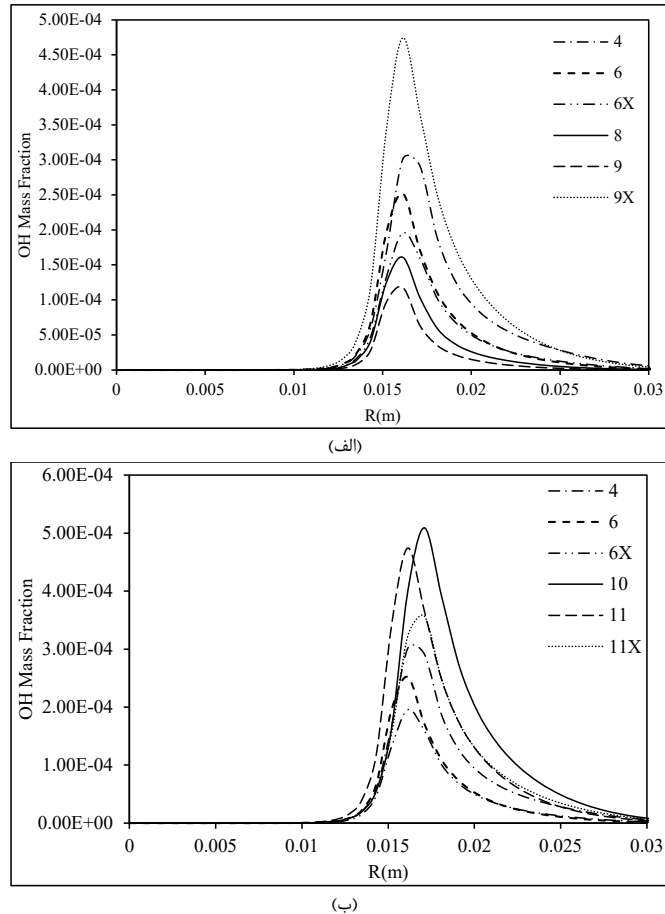


شکل ۹: اثر فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن بر کسر جرمی ناکس در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از ابتدای مشعل

Fig. 9: Chemical and physical effect of CO<sub>2</sub> injection on the NO<sub>x</sub> 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 به‌منظور افزایش کاربردهای این رژیم احتراقی در فرآیندهای احتراق صنعتی مختلف بر روی میزان پیش‌گرمایش اکسیدکننده ورودی با استفاده از محصولات داغ



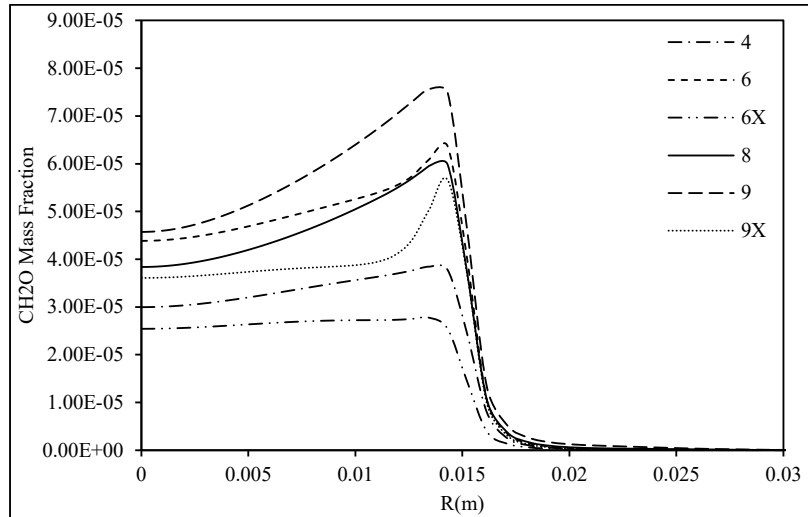
شکل ۱۰: اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن درون اکسیدکننده بر کسر جرمی رادیکال هیدروکسیل تشکیل شده در فاصله ۹۰ سانتی متری مشعل برای دماهای پیش گرمایش مختلف، الف) مقایسه دمای ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ کلوین، ب) مقایسه دمای ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین

**Fig. 10: Chemical and physical effects of CO<sub>2</sub> 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**

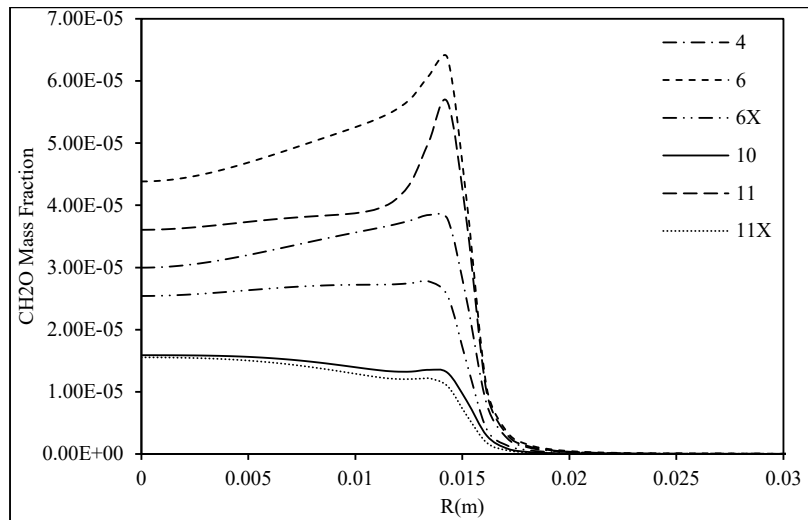
به بررسی تاثیر میزان دمای پیش گرمایش اکسیدکننده روی اثرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از تزریق دی اکسید کربن درون اکسیدکننده پرداخته شده است. در شکل ۱۰ تغییرات غلظت رادیکال هیدروکسیل در فاصله ۹۰ سانتی متری از ورودی مشعل برای دو دمای ۱۱۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین با شرایط دمای ورودی ۱۳۰۰ کلوین در شرایط تزریق ۵۰ درصد جرمی 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<sub>2</sub>O از طریق واکنش  $\text{OH} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$  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 میزان بیشینه تاثیر فیزیکی تزریق دی اکسید کربن از ۶۸ درصد کاهش غلظت این رادیکال

دستیابی به احتراق بدون شعله دمای اکسیدکننده 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 اکسیدکننده نیز اثرگذار باشد که در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.

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



(الف)



(ب)

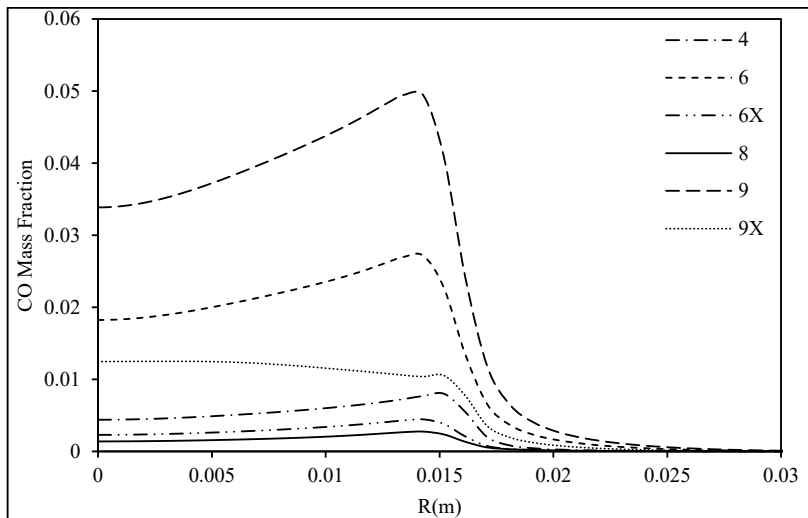
شکل ۱۱: اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن درون اکسیدکننده بر کسر جرمی رادیکال فرمالدهید تشکیل شده در فاصله ۹۰ سانتی متری مشعل برای دماهای پیش گرمایش مختلف، الف) مقایسه دمای ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ کلوین، ب) مقایسه دمای ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین

**Fig. 11: Chemical and physical effects of CO<sub>2</sub> injection into oxidizer on the CH<sub>2</sub>O 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**

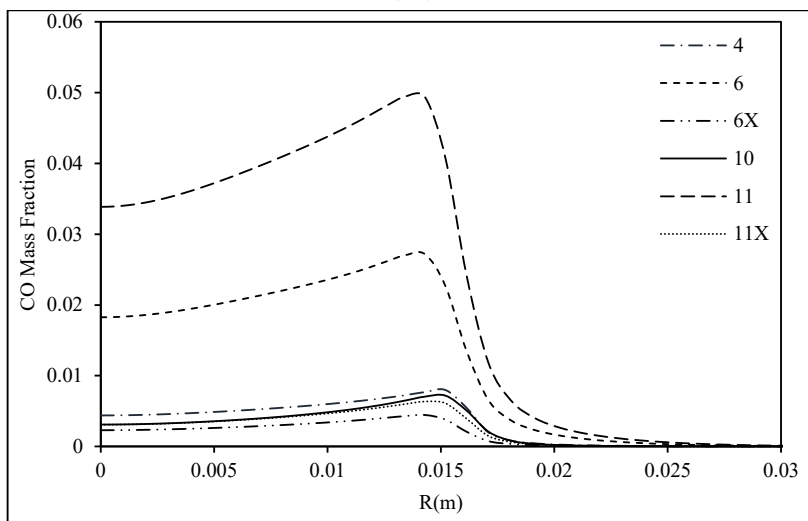
با نتایج بدست آمده با افزایش دما تاثیر شیمیایی حضور دی اکسید کربن در واکنشها منجر به افزایش میزان فرمالدهید (CH<sub>2</sub>O) آزاد شده می گردد که این موضوع به علت افزایش نرخ واکنش  $CH_2(s) + CO_2 \leftrightarrow CO + CH_2O$  با افزایش دمای پیش گرمایش می باشد که افزایش میزان فرمالدهید منتشر شده را منجر 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 واکنشهای 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



(الف)



(ب)

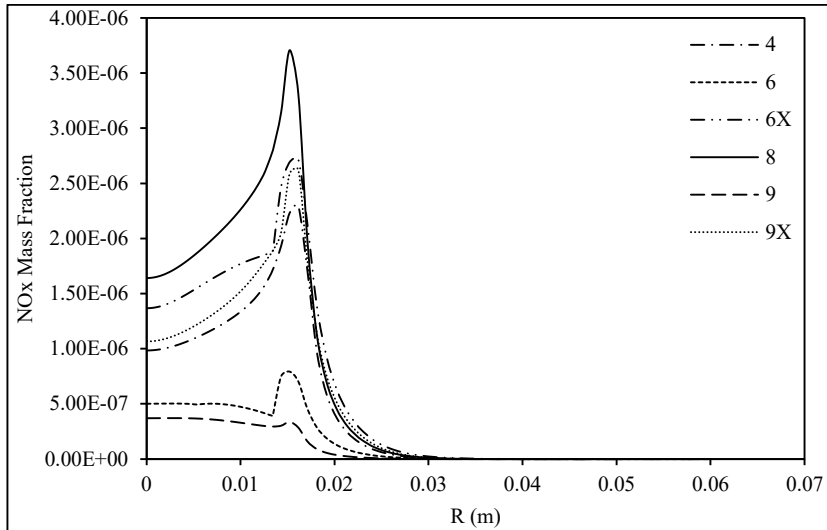
شکل ۱۲: اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده بر کسر جرمی کربن مونوکسید تشکیل شده در فاصله ۹۰ سانتی متری مشعل برای دماهای پیش‌گرمایش مختلف، (الف) مقایسه دمای ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ کلوین، (ب) مقایسه دمای ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین

**Fig. 12: Chemical and physical effects of CO<sub>2</sub> 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**

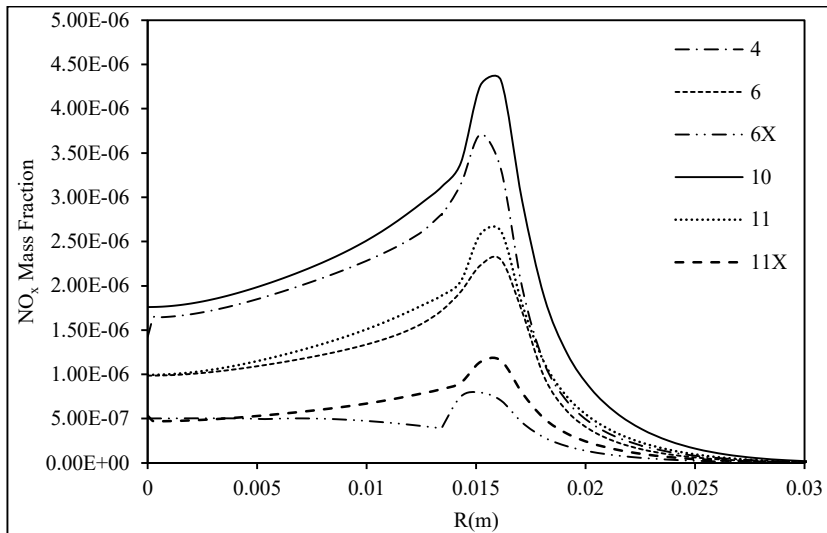
شیمیایی منجر به افزایش ۰/۰۴۵ در بیشینه مقدار مونوکسید کربن تولیدی می‌شود در حالی که در دمای ۱۱۰۰ کلوین تاثیر شیمیایی تزریق منجر به افزایش ۰/۰۰۸ در کسر جرمی مونوکسید کربن تولیدی می‌شود. علت این امر افزایش نرخ واکنش و فعالیت واکنش‌هایی است که در آن‌ها دی‌اکسید کربن تجزیه شده و به مونواکسید کربن تبدیل می‌گردد که مهمترین واکنش با بررسی نرخ واکنش‌های شیمیایی  $CO_2 + M \leftrightarrow CO + O + M$  است. تاثیر فیزیکی ناشی از تزریق در مقایسه با تزریق شیمیایی تاثیر بسیار کمتری داشته و با توجه به نتایج حاصل شده این موضوع مستقل از دمای پیش‌گرمایش ورودی است.

۲-۳-۴- تاثیر میزان دمای پیش‌گرمایش اکسیدکننده بر اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی‌اکسید کربن روی انتشار آلاینده مونواکسید 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 دی‌اکسید کربن به صورت قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. این تاثیر به‌گونه‌ای است که در دمای ۱۵۰۰ کلوین اثرات شیمیایی حاصل از حضور دی‌اکسید کربن در واکنش‌های



(الف)



(ب)

شکل ۱۳: اثرات فیزیکی و شیمیایی تزریق دی اکسید کربن درون اکسیدکننده 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 CO<sub>2</sub> injection into oxidizer on the NO<sub>x</sub> 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 اکسیدکننده 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- جمع بندی

تزریق دی اکسید کربن در شرایط تزریق مقادیر بالاتر آن درون اکسیدکننده می باشد.

ج- با افزایش دمای پیش گرمایش اکسیدکننده میزان تاثیر شیمیایی تزریق دی اکسید کربن درون جریان اکسیدکننده افزایش یافته و میزان مونوکسید کربن تولید شده به صورت قابل توجهی تغییر می کند. با افزایش دمای پیش گرمایش نقش واکنش های تجزیه دی اکسید کربن به مونوکسید کربن به خصوص واکنش  $CO_2 + M \leftrightarrow CO + O + M$  به شکل قابل توجهی افزایش می یابد.

د- افزایش دمای پیش گرمایش اکسیدکننده منجر به تغییر در مقادیر رادیکال های هیدروکسیل و فرمالدهید می شود. در این شرایط غلظت رادیکال هیدروکسیل افزایش پیدا کرده و به صورت یکنواخت تری است که این بیانگر توزیع حرارت یکنواخت تر می باشد.

## 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 (CO<sub>2</sub>) Capture and Storage Technology: Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Storage and Utilisation, Elsevier, 2010.
- [7] Y. Tu, K. Su, H. Liu, S. Chen, Z. Liu, C. Zheng, Physical and chemical effects of CO<sub>2</sub> addition on

با توجه به چالش گرمای جهانی در سال های اخیر و انجام مطالعات گسترده بر روی روش های مختلف به منظور کاهش گازهای انتشار دی اکسید کربن به عنوان اصلی ترین گاز گلخانه ای، در مطالعه حاضر به بررسی عددی تاثیر تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کننده در احتراق متان/هیدروژن-هوای بدون شعله پرداخته شد. بدین منظور از مشعل احتراقی جی.اچ.سی جهت انجام بررسی ها استفاده گردیده و تاثیر تزریق مقادیر مختلف دی اکسید کربن درون اکسید کننده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. با توجه به پیش گرمایش مخلوط احتراقی در احتراق بدون شعله تا دمای خوداشتعالی، اثر دمای پیش گرمایش 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 دی اکسید کربن در شرایط مختلف مورد بررسی بر روی میزان نرخ واکنش ها به عنوان یکی از اصلی ترین کمیت های 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 دی اکسید کربن بر روی آلاینده های کربن مونوکسید و ناکس تحت شرایط تزریق مقادیر مختلف دی اکسید کربن و همچنین بررسی اثر پیش گرمایش بر روی این تزریق مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. مهمترین نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر عبارتند از:

الف- افزایش میزان دی اکسید کربن تزریق شده منجر به کاهش میزان نرخ واکنش ها از طریق کاهش غلظت رادیکال هیدروکسیل می گردد. علاوه بر این با افزایش مقادیر تزریق به علت کاهش بیشینه دما میزان آلاینده ناکس تولید شده نیز به صورت قابل توجهی کاهش پیدا می کند.

ب- واکنش های تجزیه دی اکسید کربن به مونوکسید کربن در سینتیک های شیمیایی در شرایط تزریق دی اکسید کربن درون اکسیدکننده اهمیت بسیار بالایی در پیش بینی میزان حرارت آزاد شده و توزیع آلاینده های کربن مونوکسید و ناکس دارد. این اهمیت با افزایش میزان دی اکسید کربن تزریق شده به صورت قابل توجهی افزایش می یابد 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).
- CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> 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 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> on a Jet-in-Hot-Coflow Burner Diluted by N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O, *Energy & Fuels*, 31(3) (2017) 3270-3280.
- [9] L. Wang, Z. Liu, S. Chen, C. Zheng, J. Li, Physical and chemical effects of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O 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 CH<sub>4</sub>-jet flame in hot O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> on the NO<sub>x</sub> formation behavior in the CH<sub>4</sub> 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 CO<sub>2</sub> on the temperature