

مطالعه عددی تاثیر تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کننده در احتراق متان - اکسیژن بدون شعله

اسماعیل ابراهیمی فردویی
کیومرث مظاهری*

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

هدف از مطالعه حاضر بررسی عددی تاثیر تزریق دی اکسید کربن بر احتراق متان - اکسیژن بدون شعله می باشد. بدین منظور رژیم های مختلف تشکیل شده در احتراق متان - اکسیژن، توزیع دما و نرخ آزادسازی حرارت در مقادیر مختلف تزریق دی اکسید کربن، حداقل مقدار CO_2 مورد نیاز برای تزریق درون اکسیدکننده جهت دستیابی به احتراق متان - اکسیژن بدون شعله و بیشینه مقدار دی اکسید کربن قابل تزریق درون اکسیدکننده مورد بررسی قرار گرفته است. از حلگر شعله نفوذی جریان متقابل به منظور انجام شبیه سازی ها استفاده شده است. به منظور ارائه نتایج از حالتی مینا با دمای پیش گرمایش 1400 کلوین استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که تزریق CO_2 درون اکسیدکننده منجر به کاهش دمای بیشینه و متوسط احتراقی می گردد. در مقادیر تزریق بالاتر از 80 درصد کسر مولی اکسیدکننده، این تزریق سبب می شود تا از بیشینه و متوسط دمایی نسبت به احتراق سوخت - هوا با تزریق نیتروژن داخل اکسیدکننده آن، کاسته شود. علاوه بر این نتایج نشان دهنده آن است که تا قبل از دستیابی به احتراق بدون شعله، میزان بیشینه دی اکسید کربن قابل تزریق درون اکسیدکننده مقداری ثابت داشته و با افزایش دمای پیش گرمایش تغییر نمی کند.

واژه های کلیدی: تزریق دی اکسید کربن، رژیم های احتراقی، احتراق متان - اکسیژن بدون شعله، شعله نفوذی جریان متقابل.

Numerical Study of Carbon Dioxide Injection Effect into Oxidizer in Flameless Oxy-fuel Combustion

E. Ebrahimi Fordoei
K. Mazaheri

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

Abstract

The aim of present study is numerical investigation of carbon dioxide injection effect on the flameless oxy-fuel combustion. For this purpose, different subjects have been analyzed such as various regimes composed in oxy-fuel combustion, temperature distribution and heat release in different values carbon dioxide injection, minimum amount of CO_2 for injection in oxidizer and maximum carbon dioxide injected into oxidizer. The counter flow diffusion flame solver used to steady and axisymmetric simulations. Also, a base condition is used with preheating temperature equal $1400K$ to deliver results. The obtained results show that injection of carbon dioxide into the oxidizer to reduce the maximum and mean combustion temperature. In the carbon dioxide injection over 80 percent of oxidizer mole fraction, this injection causes the maximum and average temperature reduced than air-fuel combustion with nitrogen injection into oxidizer. As well as, this results indicate that prior to achieve flameless combustion the maximum amount of carbon dioxide injectable into the oxidizer is constant and does not change by increasing of preheating temperature.

Keywords: Carbon dioxide injection, Combustion regimes, Flameless methane-fuel combustion, Counter flow diffusion flame.

اکسیژن به عنوان راهکاری برای جداسازی و ضبط دی اکسید کربن به عنوان اصلی ترین گاز گلخانه ای، مورد استفاده قرار گرفته است ([۲، ۱]). از طرفی به منظور کاهش آلایندگی ناکس در فرآیندهای احتراقی با بازدهی بالا از احتراق بدون شعله^۲ استفاده شده است [۳]. استفاده از فرآیند احتراق ترکیبی سوخت - اکسیژن بدون شعله می تواند علاوه بر افزایش بازدهی فرآیند احتراق منجر به کاهش تولید آلایندگی ناکس گردیده و شرایط را برای جداسازی دی اکسید کربن فراهم نماید

۱- مقدمه

گرمایش زمین در اثر انتشار گازهای گلخانه ای و انتشار آلایندگی سمی و خطرناک ناکس دو چالش مهمی هستند که در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. یکی از اصلی ترین منابع تولید این آلایندگی ها استفاده از سوخت های فسیلی جهت تامین انرژی مورد نیاز در فرآیندهای احتراقی می باشد. راهکارهای مختلفی برای کاهش هر یک از این آلایندگی ها پیشنهاد شده است. استفاده از احتراق سوخت -

¹Carbon capture storage (CCS)
²Flameless combustion

پیش‌گرمایش مورد نیاز جهت دستیابی به احتراق بدون شعله با افزایش تزریق هیدروژن داخل سوخت اشاره کرد. بررسی عددی رقیق‌سازی و پیش‌گرمایش اکسیدکننده در احتراق سوخت- هوای بدون شعله توسط دی‌جوانون و همکارانش [۱۲] انجام شد. آن‌ها در این بررسی با استفاده از حلگر شعله نفوذی جریان متقابل موجود در نرم افزار کمکین^۴ به بررسی تأثیر دماهای پیش‌گرمایش و مقادیر رقیق‌سازی مختلف هوا پرداختند. همچنین در این بررسی به تعیین رژیم‌های احتراقی مختلف در دمای پیش‌گرمایش ۱۴۰۰ کلوین با استفاده از رقیق‌سازی‌های مختلف پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که برای دستیابی به احتراق بدون شعله در مقادیر مختلف رقیق‌سازی، دمای مخلوط احتراقی باید بیشتر از دمای خوداشتعالی آن باشد. علاوه بر این افزایش رقیق‌سازی در یک دمای پیش‌گرمایش ثابت منجر به توزیع دمایی یکنواخت‌تر گردیده تا اینکه این افزایش منجر به عدم انجام واکنش‌های احتراقی و خاموشی شعله شود. بررسی یک بعدی تأثیر رقیق‌سازی و پیش‌گرمایش سوخت با استفاده از حلگر جریان متقابل یک بعدی و پایا نیز توسط دی‌جوانون و همکاران [۱۳] با استفاده از نرم افزار کمکین صورت پذیرفت. در این مطالعه به بررسی رژیم‌های احتراقی در مقادیر مختلف پیش‌گرمایش و رقیق‌سازی سوخت و همچنین تأثیرات تغییر فشار بر این رژیم‌ها پرداخته شد. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که آزادسازی گرمای بیشینه در احتراق بدون شعله در کسر مخلوط استوکیومتری اتفاق افتاده که این موضوع برخلاف حالتی است که در آن رقیق‌سازی و پیش‌گرمایش در سمت هوا انجام می‌شود. علاوه بر این، نتایج حاکی از کاهش ناحیه احتراقی بدون شعله با افزایش فشار دارند. بررسی تأثیرترریق دی‌اکسیدکربن روی توزیع دما در احتراق سوخت- اکسیژن توسط سونگ و همکاران [۱۴] با استفاده از حلگر شعله نفوذی جریان متقابل انجام پذیرفت. نتایج بدست آمده از این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش میزان کسر مولی اکسیژن در سمت اکسید کننده از ۲۰ تا ۲۸ درصد در حالت احتراق متان با مخلوط O_2/CO_2 ، میزان اختلاف میان بیشینه دمای فرآیند احتراق متان با اکسیژن خالص نسبت به احتراق متان با مخلوط O_2/CO_2 به صورت پیوسته افزایش یافته و با افزایش مقدار اکسیژن در محدوده ۲۸ تا ۳۲ درصد کسر مولی اکسید کننده‌ها، این اختلاف دمایی ثابت بوده و دستخوش تغییر نمی‌شود که این موضوع متأثر از واکنش‌های شیمیایی است که اتفاق می‌افتد. سابی و همکاران [۱۵] به بررسی رفتار دینامیکی در احتراق سوخت- اکسیژن بدون شعله پرداخته و اثرات شیمیایی ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه تنها تأثیر دی‌اکسید کربن بر روی واکنش‌های شیمیایی بررسی شده و روی اثرات فیزیکی آن بحثی انجام نشده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که تزریق دی‌اکسید کربن می‌تواند روی توزیع دما و افزایش بازدهی سیستم احتراقی از طریق تغییر در واکنش‌های شیمیایی اثر گذار باشد. در واقع دی‌اکسید کربن تزریق شده می‌تواند با شرکت در واکنش‌های شیمیایی دو مولکولی^۵ و سه مولکولی^۶ به عنوان یک گونه جدید منجر به تولید

[۴]. در حال حاضر احتراق بدون شعله روی اصول بازچرخش گازها و گرمای محصولات احتراق عمل می‌کند [۵]. بازچرخش محصولات داغ احتراقی که مقادیر بسیار ناچیزی از اکسیژن را شامل می‌شوند منجر به کاهش غلظت اکسیژن به صورت موضعی شده و دمای واکنش‌دهنده‌ها را افزایش می‌دهد. این موضوع سبب کندشدن واکنش‌ها گردیده و ناحیه‌ی واکنشی توزیع شده را ایجاد می‌نماید [۵]. توزیع و انتشار گرمای آزاد شده به یک ناحیه واکنشی با حجم بیش‌تر منجر به ایجاد توزیع دمایی تقریباً یکنواخت با ماکزیمم دمای کم‌تر می‌شود. در نتیجه شار تشعشی خالص به‌میزان قابل توجهی افزایش یافته [۵] و انتشار آلاینده‌های زیست محیطی به خصوص ناکس نسبت به شعله‌های معمولی به‌شدت کاهش می‌یابد [۸] - [۴]. هر میزان بازچرخشی منجر به دستیابی به احتراق بدون شعله نشده و مقدار بازچرخش باید به اندازه‌ای باشد که شرایط را برای ایجاد احتراق بدون شعله فراهم نماید. از این‌رو چندین مطالعه پیرامون دستیابی به رژیم‌های گوناگون احتراقی در مقادیر متفاوت باز چرخش محصولات احتراقی انجام شده است.

سورنتینو و همکاران [۹] به بررسی یک بعدی احتراق متان و هوای بدون شعله با استفاده از حلگر جریان متقابل شعله نفوذی پرداختند. در این بررسی هوا تحت دماهای پیش‌گرمایش مختلف از یک سمت و متان با مقادیر مختلف تزریق گاز نیتروژن از سمت دیگر وارد شده و رژیم‌های مختلف احتراقی را ایجاد کردند. بررسی در فشارهای ۱ و ۱۰ بار با نرخ کرنش ثابتی معادل با ۵۰ انجام گردید. نتایج بدست آمده از این بررسی نشان می‌دهند که در این حالت ناحیه احتراقی بدون شعله نسبت به حالتی که رقیق‌سازی و پیش‌گرمایش هر دو در سمت هوا انجام می‌گیرد، گستردگی بیشتری داشته که این موضوع به علت افزایش کمتر بیشینه دما در حالت تزریق نیتروژن داخل متان نسبت به تزریق نیتروژن داخل هوا می‌باشد. سبیانا و جایانته [۱۰] به بررسی ساختار شعله در احتراق سوخت- اکسیژن پرداخته و اثر تزریق دی‌اکسید کربن بر ساختار شعله را مورد بررسی قرار دادند. این بررسی به کمک نرم افزار تجاری فلوئنت انجام گردیده و در آن از مدل فیلیمت^۱ پایا استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که تزریق دی‌اکسید کربن درون مخلوط احتراقی منجر به انتقال وقوع بیشینه دمایی به ناحیه‌ای با کسر مخلوط بزرگتر گردیده است. بررسی تأثیر افزودن هیدروژن به سوخت‌های زیستی^۲ در احتراق سوخت- اکسیژن بدون شعله با استفاده از شعله نفوذی جریان متقابل^۳ توسط چن و شنگ [۱۱] انجام گرفت. در این مطالعه به بررسی غلظت‌های مختلف هیدروژن در مخلوط سوخت ورودی پرداخته شد. همچنین غلظت‌های مختلف اکسیژن در اکسیدکننده که با استفاده از گازهای داغ حاصل از احتراق پیش‌گرم و رقیق‌سازی می‌شد، مورد مطالعه قرار گرفت. امکان دستیابی به احتراق بدون شعله با استفاده از دماهای ورودی پایین اکسیدکننده در شرایط رقیق‌سازی بسیار زیاد (رقیق‌سازی جرمی حدود ۹۰ درصد) از نتایج بدست آمده توسط آن‌ها بود. از نتایج مهم دیگر این مطالعه می‌توان به کاهش دمای

^۴Chemkin

^۵Bimolecular

^۶Termolecular

^۱Flamelet

^۲Biogas

^۳Counter flow diffusion flame

اکسیژن بدون شعله از جمله دما و توزیع گونه‌ها داشته و بسیاری از محدودیت‌های حاکم بر آن مانند نیازمندی به مقادیر نرخ مومنوم بسیار بالا را برطرف سازد. از این‌رو در مطالعه حاضر با توجه به اینکه تا کنون به بررسی اثر تزریق دی‌اکسید کربن در احتراق سوخت-اکسیژن بدون شعله پرداخته نشده است، به بررسی حداکثر میزان دی‌اکسید کربن قابل تزریق درون اکسیدکننده پرداخته و تاثیر آن بر تشکیل رژیم‌های احتراقی مختلف و احتراق بدون شعله را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲- معادلات حاکم

مطالعه حاضر با استفاده از شبیه‌سازی عددی شعله نفوذی جریان متقابل در حالت پایا انجام شده است. بدین منظور با استفاده از نرم افزار کمکین به حل مسئله شعله نفوذی بین دو نازل که هر یک از ورودی‌های متان و اکسیدکننده در آن کاملاً مجزا بوده و در مقابل یکدیگر قرار دارند، پرداخته می‌شود. این نرم‌افزار ابزاری مناسب برای حل مسائل دارای سینتیک شیمیایی پیچیده و مفصل بوده که عمدتاً در فرآیندهای احتراقی و شیمیایی جهت فهم بهتر تاثیر واکنش‌های شیمیایی بر موضوعات مختلفی همچون توزیع گونه‌های شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت با استفاده از انتقال تشابهی، میدان جریان به مسئله‌ای یک بعدی کاهش یافته و برای یک جریان متقارن محوری یا دوبعدی قابل کاربرد می‌باشد. برای حالت متقارن محوری که در مطالعه حاضر از آن استفاده شده است، حل تشابهی فرض می‌نماید که مولفه شعاعی سرعت خطی بوده و سایر متغیرهای وابسته جریان تنها تابعی از جهت محوری می‌باشند.

برای بیان معادلات با توجه به فرضیات بیان شده نیاز به تعریف دو متغیر تشابهی می‌باشد که مطابق معادلات (۱) و (۲) تعریف می‌شوند.

$$G(x) = \frac{-\rho v}{r} \quad (1)$$

$$F(x) = \frac{\rho u}{2} \quad (2)$$

همچنین برای بیان روابط به شکلی ساده‌تر نیاز به در نظر گرفتن یک مقدار ویژه می‌باشد که این مقدار ویژه مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$H = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \text{constant} \quad (3)$$

معادلات حاکم بر جریان سیال با اعمال متغیرهای تشابهی و تابع ویژه در نظر گرفته شده به صورت معادلات (۴) تا (۷) تعریف می‌شوند.

پیوستگی:

$$G(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (4)$$

مومنوم محوری:

$$H - 2 \frac{d}{dx} \left(\frac{FG}{\rho} \right) + 3 \frac{G^2}{\rho} + \frac{d}{dx} \left(\mu \frac{d}{dr} \left(\frac{G}{\rho} \right) \right) = 0 \quad (5)$$

انرژی:

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k c_{p,k} Y_k V_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{\omega}_k = 0 \quad (6)$$

اجزایی شود که نسبت به نیتروژن موجود در هوا ظرفیت حرارتی بیشتری داشته و بدین ترتیب منجر به تغییر در دمای آدیاباتیک شعله و همچنین فراهم آوردن شرایط تشکیل احتراق بدون شعله گردد. بررسی انجام شده توسط سابیا تنها اثرات سینتیکی ناشی از تزریق دی‌اکسید کربن را از طریق شبیه‌سازی راکتوری مورد بررسی قرار داده و از اثرات فیزیکی آن مانند تاثیر تزریق دی‌اکسید کربن بر روی نرخ مومنوم صرف نظر کرده است. کویاتکوسکی و همکاران [۱۶] به بررسی رژیم‌های احتراقی غیر پیش‌آمیخته با استفاده از مخلوط سوخت‌های با ارزش حرارتی کم^۱ و هوا به صورت تجربی و عددی پرداختند که مطالعه عددی با استفاده از حلگر جریان متقابل یک بعدی و با استفاده از نرم افزار کمکین انجام پذیرفت. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که استفاده از این سوخت‌ها منجر به کاهش میزان دمای پیش‌گرمایش لازم برای دستیابی به رژیم احتراقی بدون شعله با توجه به کاهش دمای خوداشتعالی نسبت به سوخت‌های گازی با ارزش حرارتی بالا هم چون متان می‌گردد. علاوه بر این استفاده از این سوخت‌ها منجر به کاهش متوسط دمایی در فرآیندهای احتراقی مختلف در شرایط پیش‌گرمایش و رقیق‌سازی مشابه با سوخت متان می‌شود. در واقع در فرآیندهای احتراقی که نیاز به دمای فرآیندی پایین‌تری دارند، استفاده از این سوخت‌ها می‌تواند نتایج بهتری داشته باشد. مطالعه عددی تشکیل ناکس و کربن مونوکسید در احتراق سوخت- هوا و سوخت اکسیژن بدون شعله توسط چنونگ و همکاران [۱۷] در شرایط احتراقی بدون شعله به کمک حلگر شعله نفوذی جریان متقابل و با استفاده از نرم‌افزار کمکین انجام گرفت. در این مطالعه مشاهده شد که رقیق‌سازی با استفاده از دی‌اکسید کربن در شرایط احتراق MILD منجر به تولید میزان ناکس بسیار کمتری نسبت به شرایط استفاده از نیتروژن خالص جهت دستیابی به احتراق بدون شعله خواهد شد. مامری و همکاران [۱۸] نیز به مطالعه شرایط مختلف دستیابی به احتراق بدون شعله با استفاده از مخلوط سوخت بیوگاز- هیدروژن با استفاده از نرم افزار کمکین و به کمک حلگر شعله نفوذی جریان متقابل پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود مشاهده کردند که نرخ تولید NO، CO، OH و H₂O با کاهش غلظت اکسیژن ورودی کاهش خواهد یافت. همچنین افزودن هیدروژن به درون سوخت می‌تواند منجر به تسهیل در دستیابی به احتراق بدون شعله با استفاده از بیوگازها گردد.

تزریق دی‌اکسید کربن به عنوان یکی از اصلی‌ترین محصولات احتراق سوخت-اکسیژن درون اکسیدکننده نسبت به احتراق سوخت-هوا که در آن بازچرخش محصولات درون اکسیدکننده به صورت عمده شامل نیتروژن می‌شود، اثرات زیادی بر روی مرز میان رژیم‌های احتراقی مختلف و مقادیر دمایی و توزیع گونه‌ها خواهد داشت. این تاثیر به علت ظرفیت حرارتی بالاتر دی‌اکسید کربن نسبت به نیتروژن و همچنین دمای خوداشتعالی مخلوط O₂/CO₂ نسبت به O₂/N₂ می‌باشد که این موضوع می‌تواند منجر به تغییر در محل رژیم‌های مختلف احتراقی و سایر پارامترها گردد. علاوه بر این، تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده می‌تواند اثرات قابل توجهی بر احتراق سوخت-

²Detailed Kinetic

¹ Low calorific value fuel

بقای گونه:

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx}(\rho Y_k V_k) - \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

در مطالعه حاضر محاسبه سرعت های نفوذ بر اساس متوسط گیری مخلوط^۱ که مطابق با رابطه (۸) می باشد، انجام شده است.

$$V_k = \frac{-1}{X_k} D_{km} \frac{dX_k}{dx} - \frac{D_k^{Th}}{\rho Y_k} \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

مقدار D_{km} نیز مطابق با رابطه (۹) محاسبه می شود.

$$D_{km} = \frac{1 - Y_k}{\sum_{j \neq k} \frac{X_j}{D_{jk}}} \quad (9)$$

همچنین به منظور محاسبه نرخ واکنش های شیمیایی، از رابطه (۱۰) استفاده می شود.

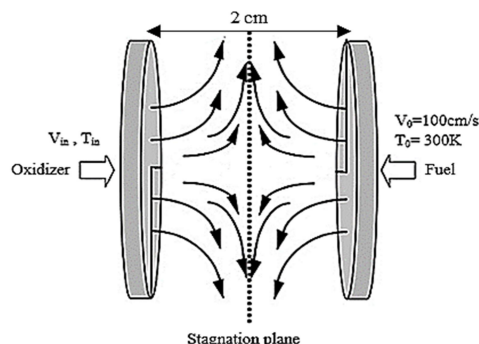
$$Q_j = K_{fj} \prod_{k=1}^N [X_k]^{\theta_{kj}} - K_{rj} \prod_{k=1}^N [X_k]^{\theta_{kj}} \quad (10)$$

$$K_{fj} = A_{fj} T^{\beta_j} \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right)$$

با توجه به معادلات فوق و فرضیات بیان شده در قسمت ابتدایی، حل به کمک یک شعله نفوذی جریان متقابل انجام می گیرد.

۳- روش حل عددی

در هندسه متقارن محوری از دو نازل دایروی هم مرکز که مستقیماً به سمت یکدیگر قرار دارند، مطابق شکل ۱ استفاده می شود. این هندسه منجر به ایجاد یک صفحه سکون بین دو نازل سوخت و اکسیدکننده می گردد که محل آن با توجه به شرایط مرزی سوخت و اکسیدکننده تعیین می شود.



شکل ۱- صفحه سکون و شرایط مرزی برای شعله نفوذی جریان متقابل

شرایط مرزی حاکم بر مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است. سرعت و دمای جریان سوخت که در بررسی حاضر متان می باشد، ثابت و به ترتیب برابر با ۱۰۰ cm/s و ۳۰۰ K در نظر گرفته شده است. دمای اکسیدکننده که مخلوطی با کسر مولی های متفاوت از O_2 و CO_2 می باشد، با توجه به دمای پیش گرمایش مخلوط متغیر بوده و در بررسی های انجام شده بین ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. علاوه بر این سرعت مخلوط اکسیدکننده (مخلوط O_2/CO_2) به گونه ای محاسبه شده تا صفحه سکون در ناحیه میانی دو جریان قرار گیرد تا در شرایط متفاوت حاکم بر مسئله محل تشکیل این صفحه تغییر نکند (این کار با برابر قرار دادن مومنتوم در جریان متان و اکسید

کننده انجام شده است).

در شکل ۲ شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده نشان داده شده است. در نرم افزار کمکین از یک شبکه غیریکنواخت به منظور حل عددی جریان شعله نفوذی جریان متقابل آرام استفاده شده که مقدار غیریکنواختی شبکه محاسباتی به وسیله یک مقدار مشخصی تعیین می گردد که در مطالعه حاضر این مقدار برابر با ۰.۲۵ در نظر گرفته شده است. این غیریکنواختی در شبکه حل عددی به سمت محل تشکیل شعله تمایل داشته که این موضوع به علت وجود گرادیان های شدید دما و گونه ها در این قسمت می باشد.



شکل ۲- شماتیکی از شبکه حل در شبیه سازی ها حاضر

مکانیزم C1-C3 شامل ۱۰۷ گونه و ۲۶۴۲ واکنش برای شبیه سازی ها استفاده شده است [۱۹]. این سینتیک شامل محصولات گوناگونی از جمله دی اکسید کربن، بخار آب و کربن مونوکسید می باشد که با توجه به بررسی های انجام شده در مراجع ([۲۰], [۲۱])، دقت بسیار خوب آن در شبیه سازی رژیم های مختلف احتراقی از جمله رژیم احتراقی بدون شعله، انتخاب شده است. برای گسسته سازی ترم های جابه جایی و نفوذ از روش اختلاف مرکزی استفاده شده است. استفاده از این روش منجر به جلوگیری از ایجاد نفوذ عددی در حل گردیده و دقت بالاتری نسبت به روش گسسته سازی آپویند فراهم می آورد.

۴- اعتبارسنجی حلگر مورد استفاده

به منظور اعتبارسنجی حلگر مورد استفاده از نتایج آزمایشگاهی مربوط به مرجع [۲۲] که مربوط به احتراق سوخت متان در شرایط اکسیژن غنی می باشد، استفاده شده است. این کار به علت عدم وجود نتایج تجربی کاملاً مشابه با موضوع مورد بررسی انجام شده است. بدین منظور با توجه به کار تجربی انجام شده، فاصله نازل های سوخت و هوا برابر با ۱.۲ سانتی متر در نظر گرفته شده است. سرعت جریان سوخت که مخلوطی از متان و نیتروژن می باشد مشابه با سرعت جریان اکسیدکننده که مخلوطی با ۷۰ درصد کسر مولی نیتروژن و ۳۰ درصد کسر مولی اکسیژن می باشد بوده و برابر با ۱۹ سانتی متر بر ثانیه می باشد. سایر تنظیمات مربوط به حلگر از جمله نحوه گسسته سازی و سینتیک مورد استفاده کاملاً مشابه با مطالب بیان شده در قسمت های قبل می باشد.

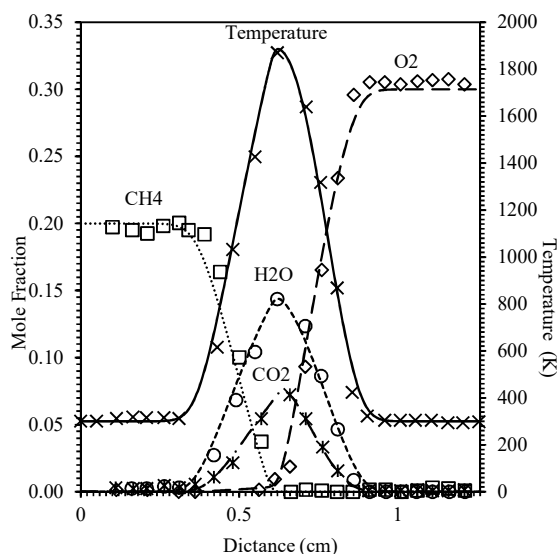
²Central difference

¹ Mixture averaging

بتوانیم بررسی عمیق‌تری از ساختارهای واکنشی داشته و بتوانیم ارزیابی ساده‌تری از تغییرات آن‌ها نسبت به ساختارهای تغذیه شونده داشته باشیم.

شکل ۴ و ۵ به ترتیب نشان دهنده تغییرات دما برحسب کسر مخلوط به ازای مقادیر مختلف تزریق دی‌اکسید کربن و نیتروژن درون اکسیدکننده (این مقادیر بیان‌گر مقدار کسر مولی دی‌اکسید کربن و نیتروژن سمت اکسیدکننده می‌باشد) در دمای پیش‌گرمایش اکسیدکننده مبنا می‌باشد. با مقایسه نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که در شرایطی که تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده انجام شده است، نسبت به حالت تزریق نیتروژن رفتارهای متفاوتی مشاهده می‌شود. تزریق دی‌اکسید کربن معادل با ۸۰ درصد کسر مولی اکسیدکننده در احتراق متان- اکسیژن منجر به میزان بیشینه و متوسط دمایی پایین‌تری نسبت به حالت تزریق ۸۰ درصد نیتروژن در احتراق متان- هوا با دمای پیش‌گرمایش مشابه می‌شود. در این حالت با افزایش میزان تزریق درون اکسیدکننده به بیش از ۸۰ درصد مشاهده می‌شود که بیشینه دمایی در حالت تزریق دی‌اکسید کربن نسبت به حالتی که تزریق نیتروژن انجام شده کاهش بیشتری داشته است. برای توضیح در مورد این رفتار باید به دو نکته توجه داشت. جایگزینی اکسیژن به جای نیتروژن در اکسیدکننده همان طور که پیش از این بیان شد، منجر به افزایش دما می‌شود. از طرفی تزریق دی‌اکسید کربن به جای نیتروژن به علت ظرفیت گرمایی بسیار بالاتر آن (در صورتی که دی‌اکسید کربن در واکنش‌های شیمیایی به میزان قابل توجهی شرکت نکند) منجر به جذب حرارت آزاد شده بیشتری از واکنش‌های شیمیایی گردیده است.

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقدار کاهش دما در مقادیر تزریق دی‌اکسید کربن تا حدود ۵۰ درصد در کسر مخلوط متناظر با دمای بیشینه میزان نسبتاً کمی (حدود ۴۰۰ کلوین) دارد. با افزایش تزریق و در مقادیر کسر مولی ۵۰ تا ۸۰ درصد دی‌اکسید کربن بر شدت کاهش دما افزوده شده و بیشینه دمای احتراقی حدود ۶۵۰ کلوین کاهش می‌یابد. در نهایت با تزریق بیشتر دی‌اکسید کربن (از ۸۰ تا ۹۵ درصد کسر مولی اکسیدکننده) کاهش دما به شدت افزایش پیدا کرده و بیشینه دمایی حدود ۸۵۰ کلوین کاهش می‌یابد.



شکل ۳- اعتبارسنجی حلگر با داده‌های تجربی مرجع [۲۰] (خطوط نشان دهنده داده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و علائم بیانگر داده‌های تجربی هستند)

شکل ۳ مقایسه میان توزیع دما و گونه‌های متان، اکسیژن، دی‌اکسید کربن و بخار آب در میدان حل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از حلگر شعله نفوذی جریان متقابل تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی داشته که این موضوع بیانگر معتبر بودن حلگر مورد استفاده می‌باشد.

۵- نتایج

به منظور مطالعه تاثیر مقادیر مختلف رقیق‌سازی اکسیدکننده، تغییرات دما و میزان حرارت آزاد شده مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی در دمای پیش‌گرمایش ۱۴۰۰ کلوین که به عنوان دمای پیش‌گرمایش مبنا در مطالعه حاضر انتخاب شده، انجام شده است. تغییرات هر دو کمیت برحسب کسر مخلوط مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه کسر مخلوط و کسر مخلوط استوکیومتری که در مطالعه حاضر تغییر متغیرهای مختلف برحسب آن‌ها بیان شده است، به ترتیب مطابق با روابط (۱۱) و (۱۲) می‌باشد [۲۳].

$$Z = \frac{\theta Y_F - Y_{O_2} + Y_{O_2,ox}}{\theta Y_{F,fu} + Y_{O_2,ox}} \quad (11)$$

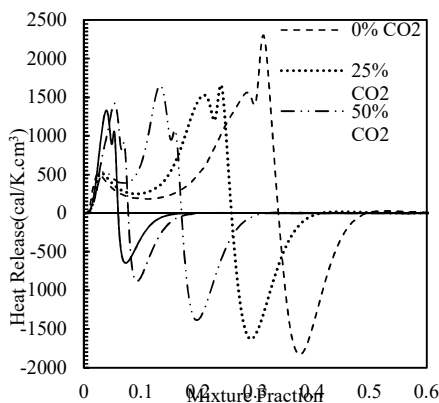
$$Z_{st} = \frac{Y_{O_2,2}}{\theta Y_{F,fu} + Y_{O_2,ox}} \quad (12)$$

کسر مخلوط تنها وابسته به شرایط ورودی جریان‌های متان و اکسیژن بوده که به کمک آن می‌توان وابستگی ساختارهای واکنشی به مقادیر مختلف رقیق‌سازی را مشاهده و بررسی نمود. مزیت بیان رفتار ساختارهای واکنشی در فضای کسر مخلوط نسبت به متغیرهای دیگر هم‌چون نسبت هم‌ارزی، استقلال و عدم وابستگی آن نسبت به استوکیومتری سوخت می‌باشد. چنین استقلالی به ما کمک می‌نماید تا

¹ Mixture fraction

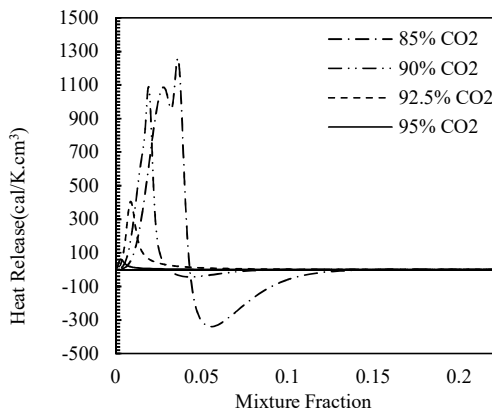
² Stoichiometry

نرخ واکنش‌های شیمیایی با افزایش تزریق دی‌اکسید کربن می‌باشد. مباحث مربوط به تزریق دی‌اکسید کربن در مورد دما که پیش از این بیان گردید، عاملی برای کاهش میزان آزادسازی حرارت می‌باشد.

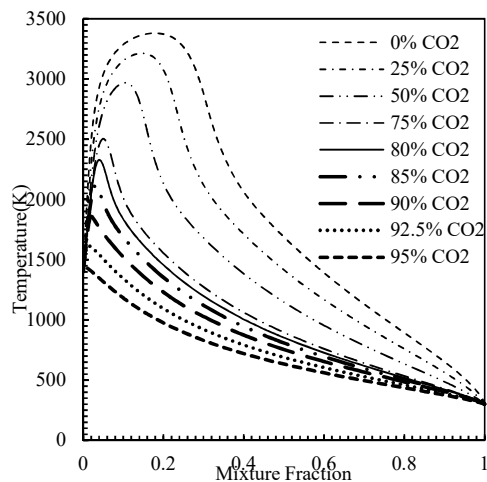


شکل ۶- مقادیر آزادسازی حرارت واکنش‌ها برحسب کسر مخلوط در مقادیر مختلف تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسید کننده در دمای پیش‌گرمایش مینا

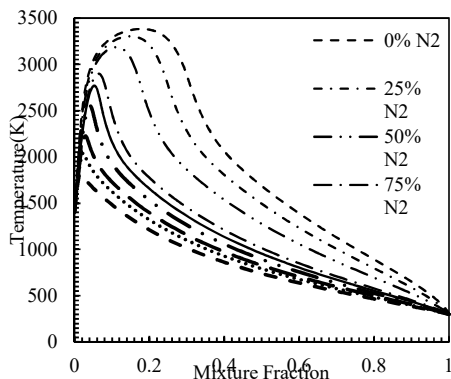
با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ و همچنین شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد که مقدار بیشینه حرارت آزاد شده در مقادیر مختلف تزریق دی‌اکسید کربن نسبت به کسر مخلوط استوکیومتری رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در واقع مقدار بیشینه حرارت آزاد شده در مقادیر تزریق دی‌اکسید کربن تا حدود ۹۰ درصد مستقل از کسر مخلوط استوکیومتری می‌باشد. برخلاف احتراق سوخت- هوا که مقدار بیشینه حرارت در کسر مخلوط‌های رقیق اتفاق می‌افتد، در احتراق متان- اکسیژن مورد مطالعه در کار حاضر مقدار بیشینه حرارت آزاد شده در کسر مخلوط غنی (بزرگتر از کسر مخلوط استوکیومتری) واقع می‌شود.



شکل ۷- مقادیر حرارت آزاد شده از واکنش‌ها برحسب کسر مخلوط در مقادیر بالای تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسید کننده در دمای پیش‌گرمایش مینا



شکل ۴- توزیع دما برحسب کسر مخلوط در مقادیر مختلف تزریق دی‌اکسید کربن درون اکسید کننده در دمای پیش‌گرمایش مینا



شکل ۵- توزیع دما برحسب کسر مخلوط در مقادیر مختلف تزریق نیتروژن درون اکسید کننده در دمای پیش‌گرمایش مینا

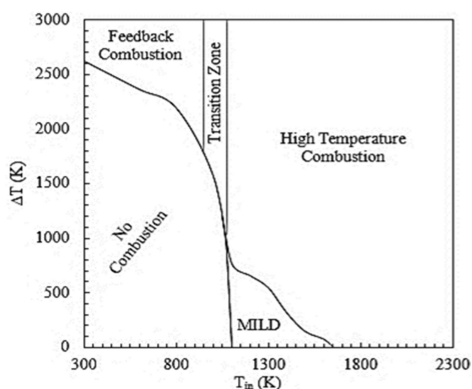
شکل‌های ۶ و ۷ نشان دهنده میزان آزادسازی حرارت^۱ برحسب کسر مخلوط به ازای مقادیر مختلف تزریق دی‌اکسید کربن در دمای پیش‌گرمایش مینا می‌باشد. در تمامی نمودارها مقادیر آزادسازی حرارت منفی بیانگر شرایطی است که در آن واکنش‌های گرماگیر می‌باشند؛ در حالی که مقادیر آزادسازی حرارت مثبت بیانگر ناحیه‌ای است که واکنش‌های اکسیداسیونی در آن اتفاق می‌افتند. با افزایش تزریق دی‌اکسید کربن ناحیه نرخ آزادسازی حرارت منفی که در آن واکنش‌های تجزیه‌ای اتفاق می‌افتند، کوچک می‌شود.

با توجه به شکل ۷، با تزریق دی‌اکسید کربن بیش از ۹۰ درصد کسر مولی اکسید کننده، این ناحیه به طور کلی از بین می‌رود. دلیل از بین رفتن ناحیه آزادسازی حرارت منفی کاهش نرخ واکنش‌ها و تغییراتی است که در رژیم احتراقی به وجود آمده است. همچنین با تزریق بیشتر دی‌اکسید کربن درون اکسید کننده محل وقوع بیشینه آزادسازی حرارتی نیز تغییر می‌کند. با افزایش تزریق دی‌اکسید کربن از مقدار گرمای آزاد شده کاسته می‌شود که این موضوع به علت کاهش

^۱ Heat release

نسبت به دمای ورودی اکسیدکننده می‌باشد. ناحیه اول مربوط به کمترین مقدار دمای اکسیدکننده ورودی و کمترین افزایش دما می‌باشد که بیانگر ناحیه‌ای است که هیچ گونه آزادسازی انرژی نداشته و در نتیجه هیچ گونه افزایش دمایی نیز مشاهده نمی‌شود. ناحیه احتراقی فیدبک^۲ با توجه به نتایج بدست آمده برای دمای اکسیدکننده ورودی کمتر از ۸۹۰ کلوین (اکسیدکننده با دمای پایین) و در شرایطی که رقیق‌سازی به وسیله دی‌اکسید کربن مقداری تقریباً کمتر از ۴۰ درصد داشته باشد، حاصل می‌شود (در دماهای کمتر از مقدار بیان شده و رقیق‌سازی بیش از ۴۰ درصد احتراق نخواهیم داشت). در این رژیم احتراقی ناحیه اکسیداسیون^۳ در نزدیکی کسر مخلوط استوکیومتری به وقوع پیوسته و پس از آن ناحیه پیرولیز^۴ (ناحیه‌ای که در آن واکنش‌های تجزیه‌ای رخ می‌دهند) واقع می‌شود.

در دماهای بالا نیز دو ناحیه احتراقی خواهیم داشت که نواحی دما بالا و بدون شعله می‌باشند. معیار تعیین هر یک از این رژیم‌ها در قسمت قبل بیان گردید. محدوده‌ای که هر یک از این رژیم‌ها برای شرایط مورد مطالعه ایجاد می‌شوند، در شکل ۹ نشان داده شده است. در بین ناحیه احتراقی دما بالا و فیدبک یک ناحیه انتقالی وجود دارد که بیانگر انتقال تدریجی از احتراق فیدبک به احتراق دما بالا می‌باشد. در واقع در این ناحیه فرآیند احتراق برخی ویژگی‌های بیان شده برای ناحیه دما بالا را داشته و برخی از ویژگی‌های آن مربوط به ناحیه احتراقی فیدبک می‌باشد. با مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج بیان شده در مرجع [۱۲] برای احتراق سوخت- هوا می‌توان مشاهده کرد که در این حالت ناحیه گذر بین حالت بدون احتراق و احتراق بدون شعله نداشته و از محدوده ناحیه احتراقی بدون شعله نیز کاسته شده است که این موضوع به علت افزایش استفاده از اکسیژن در ورودی و جایگزینی دی‌اکسید کربن با نیتروژن می‌باشد. در احتراق سوخت- اکسیژن با تزریق دی‌اکسید کربن بیشینه دمایی که در آن احتراق بدون شعله رخ می‌دهد نسبت به احتراق سوخت- هوا با تزریق نیتروژن کمتر می‌باشد. علاوه بر این محدوده احتراقی دما بالا و فیدبک نیز دستخوش تغییر شده‌اند.

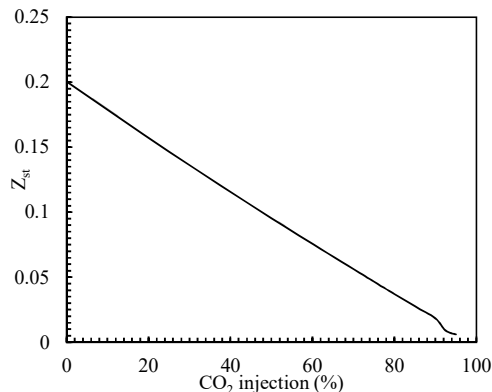


شکل ۹- رژیم‌های مختلف احتراق سوخت- اکسیژن در دماهای ورودی متفاوت اکسیدکننده

² Feedback combustion

³ Oxidation region

⁴ Pyrolysis



شکل ۸- تغییرات کسر مخلوط استوکیومتری برحسب مقادیر مختلف تزریق دی‌اکسید کربن داخل اکسیدکننده

بحث مهم دیگری که پیرامون فرآیندهای احتراقی وجود دارد، نوع رژیم احتراقی است که تحت آن فرآیند احتراق صورت می‌پذیرد. اهمیت این موضوع به دلیل میزان دمای فرآیندی قابل حصول در هر یک از رژیم‌های احتراقی، دستیابی به یک احتراق پایدار در یک رژیم احتراقی معین و همچنین بحث پیرامون میزان بیشینه دمای احتراقی و میزان آلاینده ناکس تولید شده می‌باشد. از این رو در این قسمت با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف نمودار مربوط به رژیم‌های احتراقی مختلف در احتراق سوخت- اکسیژن با اعمال پیش‌گرمایش و رقیق‌سازی با دی‌اکسید کربن به صورت هم زمان در سمت اکسیدکننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۹ بیانگر نمودار رژیم‌های احتراقی مختلف تحت شرایط بیان شده می‌باشد. برای تعیین رژیم‌های احتراقی مختلف معیارهایی در نظر گرفته شده است. معیارهای که به ازای آن رژیم احتراقی بدون شعله تعیین شده عبارتند از:

الف- ناحیه احتراقی بدون شعله زمانی ایجاد می‌شود که در آن واکنش‌های گرماگیر تجزیه‌ای حذف گردیده که در این شرایط مقادیر گرمای واکنش همواره مقدار مثبتی خواهند داشت ([۲۴], [۱۲]).
ب- رژیم احتراقی بدون شعله زمانی ایجاد می‌شود که در آن بیشینه آزادسازی حرارت در کسر مخلوط استوکیومتری واقع شود [۲۴].

ج- اختلاف میان دمای بیشینه بدست آمده در فرآیند احتراق با دمای ورودی اکسیدکننده در احتراق بدون شعله کمتر از دمای ورودی اکسیدکننده می‌باشد [۲۴].

معیار تعیین ناحیه‌ای که در آن احتراق رخ نمی‌دهد نیز صفر بودن نرخ آزادسازی حرارت و در نتیجه عدم وقوع واکنش‌های شیمیایی می‌باشد. ناحیه احتراقی دما بالا نیز زمانی ایجاد می‌شود که در آن دمای مخلوط ورودی بالا بوده و در آن خصوصیات اصلی ساختار نفوذی^۱ تغییر چندانی پیدا نمی‌کند ([۲۴] و [۱۲]).

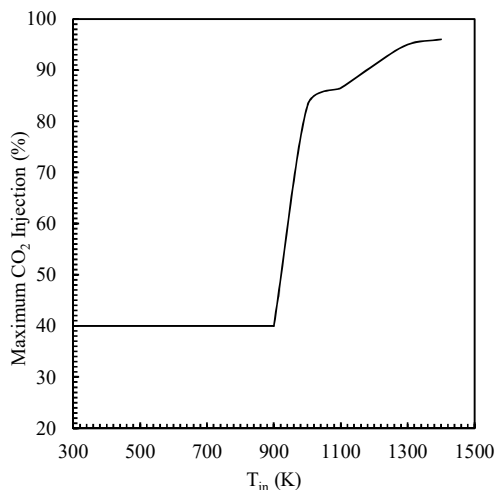
شکل ۹ به طور کلی شامل چهار رژیم احتراقی می‌باشد که مرز بین رژیم‌های مختلف از آنالیز نمودارهای دما و نرخ آزادسازی حرارت حاصل شده است (در این نمودار T_{in} مربوط به دمای اکسید کننده ورودی و ΔT نیز بیانگر بیشینه افزایش دمای ناشی از فرآیند احتراق

¹ Diffusion structure

دی اکسید کربن داریم. با توجه به شکل های ۷ و ۹ بیشینه حرارت آزاد شده و کسر مولی در فرآیند احتراق با تزریق بالای دی اکسید کربن به گونه ای که احتراق بدون شعله حاصل شود، در مقدار کسر مخلوط استوکیومتری اتفاق افتاده که این موضوع با مطالب بیان شده در مراجع [۱۲] و [۱۳] پیرامون احتراق متان- هوا و تزریق نیتروژن در آن جهت دستیابی به احتراق بدون شعله مطابقت دارد.

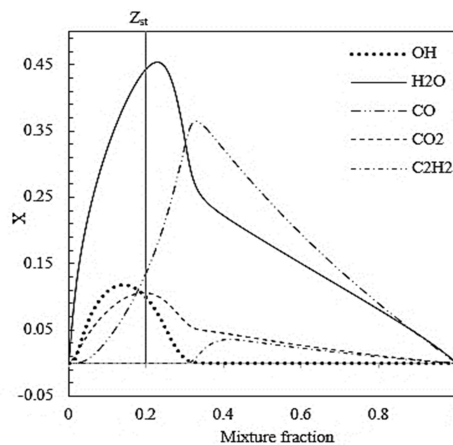
در شکل ۱۲ به بررسی بیشینه دی اکسید کربن قابل تزریق درون اکسید کننده برای انجام فرآیند احتراق و آزادسازی حرارت در دماهای پیش گرمایش مختلف اکسید کننده در ورودی پرداخته شده است.

در دماهای پایین اکسید کننده ورودی (دمای ۳۰۰ تا حدود ۹۵۰ کلوین) که فرآیند احتراقی در رژیم فیدبک اتفاق می افتد، میزان بیشینه دی اکسید کربن قابل تزریق درون اکسید کننده مستقل از دمای ورودی بوده و مقدار ثابتی برابر با ۴۰ درصد کسر مولی اکسید کننده دارد. با انتقال به رژیم احتراقی بدون شعله (در این حالت با توجه به بررسی بیشینه میزان دی اکسید کربن قابل تزریق و محدوده دمای پیش گرمایش اکسید کننده مورد بررسی و با توجه به مطالب بیان شده در قسمت قبل به طور حتم احتراق بدون شعله بدست می آید)، مقدار بیشینه دی اکسید کربن قابل تزریق درون مخلوط احتراقی به شدت افزایش پیدا می کند. با ورود به رژیم احتراقی بدون شعله با افزایش دمای پیش گرمایش اکسید کننده، میزان بیشینه دی اکسید کربن قابل تزریق افزایش می یابد. در این حالت با توجه به افزایش دمای پیش گرمایش به میزانی بیش از حد خوداشتعالی^۱ مخلوط احتراقی، امکان تزریق مقادیر بسیار بیشتر دی اکسید کربن وجود دارد. علاوه بر این با افزایش دمای پیش گرمایش مقدار انرژی اولیه لازم برای آغاز فرآیند احتراق افزایش یافته و بدین ترتیب امکان تزریق مقادیر بیشتری از دی اکسید کربن فراهم می آید.

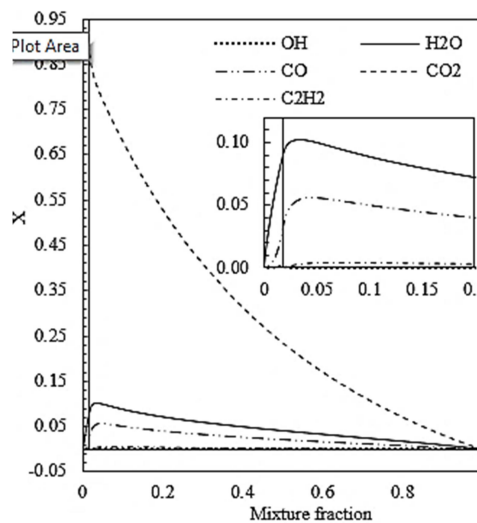


شکل ۱۲- بیشینه میزان تزریق دی اکسید کربن ممکن در دماهای ورودی مختلف اکسید کننده

بررسی حداقل میزان دی اکسید کربن لازم جهت تزریق داخل



شکل ۱۰- تغییرات کسر مولی گونه های مختلف بر حسب کسر مخلوط در حالت بدون تزریق دی اکسید کربن درون اکسید کننده



شکل ۱۱- تغییرات کسر مولی گونه های مختلف بر حسب کسر مخلوط در حالت تزریق ۹۰ درصد دی اکسید کربن درون اکسید کننده

شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تغییرات کسر مولی گونه های مختلف را بر حسب کسر مخلوط به ترتیب در دو حالت اکسید کننده بدون دی اکسید کربن و در حالتی که ۹۰ درصد تزریق دی اکسید کربن داشته ایم، نشان می دهد.

همانگونه که مشاهده می شود، تزریق مقادیر زیادی از دی اکسید کربن به گونه ای که باعث ایجاد احتراق بدون شعله گردد، منجر به کاهش غلظت گونه های OH، CO، H₂O و C₂H₂ و افزایش غلظت CO₂ در کسر مخلوط استوکیومتری می شود. کاهش غلظت رادیکال هیدروکسیل که نقش مهمی در واکنش های احتراقی دارد، خود منجر به کاهش نرخ واکنش های شیمیایی گردیده است. همین موضوع عاملی جهت کاهش بیشینه و متوسط دمای احتراقی و میزان آزادسازی حرارت می باشد. موضوع مهم دیگری که در اینجا مشاهده می شود، وقوع بیشینه مقادیر گونه ها و در واقع تشکیل شعله در مقدار کسر مخلوط استوکیومتری در حالتی است که تزریق مقادیر بالایی از

¹ Auto ignition

درون اکسیدکننده با استفاده از حلگر شعله نفوذی جریان متقابل پرداخته و موضوعات مختلفی هم چون تشکیل رژیم‌های مختلف احتراقی، تاثیر تزریق دی‌اکسید کربن بر توزیع دما و کسر مولی گونه‌ها و همچنین میزان آزادسازی حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحقیق حاضر عبارتند از:

الف- حداقل مقدار دی‌اکسید کربنی جهت تزریق درون اکسیدکننده وجود دارد که در مقادیر کمتر از آن احتراق بدون شعله حاصل نمی‌شود. این مقدار به عواملی هم چون دمای پیش‌گرمایش و نوع اکسیدکننده (هوا یا اکسیژن) وابسته می‌باشد.

ب- اختلاف بیشینه دمای حاصل از فرآیند احتراق با دمای اکسیدکننده ورودی در دماهای پیش‌گرمایش مختلف در احتراق بدون شعله تقریباً ثابت می‌باشد. با افزایش پیش‌گرمایش و با تزریق حداقل دی‌اکسید کربن درون اکسیدکننده برای دستیابی به احتراق بدون شعله، توزیع دمایی یکنواخت‌تر و متوسط دمایی بالاتری حاصل می‌شود. لذا در فرآیندهایی که نیاز به دمای متوسط بالاتر یا توزیع یکنواخت‌تری از دما می‌باشد، تزریق مقادیر دی‌اکسید کربن با دمای پیش‌گرمایش بالاتر توصیه می‌شود.

ج- در حالت احتراق سوخت- اکسیژن بدون شعله مشابه با احتراق سوخت- هوا بیشینه نرخ آزادسازی حرارت در کسر مخلوط استوکیومتری اتفاق می‌افتد.

۷- فهرست علائم

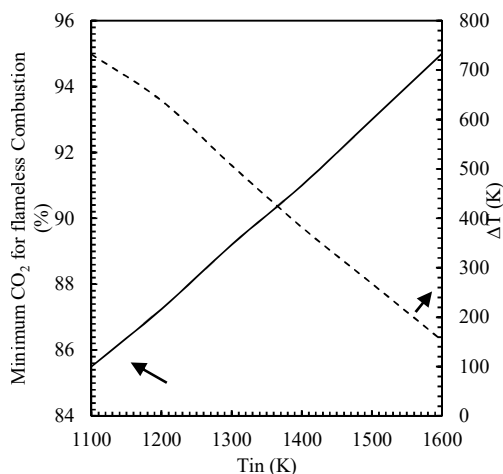
A	ثابت پیش نمایی
D	ضریب نفوذ (m^2s^{-1})
E	انرژی فعالساز ($kcal/mol$)
F	متغیر تشابهی ($kgm^{-2}s^{-1}$)
G	متغیر تشابهی ($kgm^{-3}s^{-1}$)
H	مقدار ویژه ($kgm^{-3}s^{-2}$)
h	آنتالپی (kgm^2s^{-2})
K	تعداد گونه‌ها
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Q	نرخ پیشروی واکنش
r	مختصات شعاعی (m)
T	دما (K)
u	سرعت محوری (ms^{-1})
V	سرعت نفوذ (ms^{-1})
v	سرعت شعاعی (ms^{-1})
X	کسر مولی
x	مختصات محوری (m)
Y	کسر جرمی
Z	کسر مخلوط

علائم یونانی

λ	ضریب هدایت حرارتی ($WK^{-1}m^{-1}$)
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ϑ	ضریب استوکیومتری
ρ	چگالی (kgm^{-3})

اکسیدکننده جهت دستیابی به احتراق سوخت- اکسیژن بدون شعله و همچنین اختلاف بیشینه دمای حاصل شده نسبت به دمای مخلوط ورودی در دماهای پیش‌گرمایش مختلف اکسیدکننده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل منحنی خط چین بیانگر میزان افزایش دما نسبت به دمای ورودی اکسیدکننده در حالت تزریق حداقل دی‌اکسید کربن بدست آمده از حل عددی جهت دستیابی به احتراق بدون شعله بوده و خط توپر مربوط به حداقل میزان دی‌اکسید کربنی است که باید به منظور ایجاد احتراق بدون شعله درون اکسیدکننده تزریق گردد.

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش دمای پیش‌گرمایش بر میزان حداقل دی‌اکسیدکربنی که جهت دستیابی به احتراق بدون شعله نیاز است، افزوده می‌شود. همچنین با افزایش دمای پیش‌گرمایش از میزان اختلاف دمای بیشینه احتراقی نسبت به دمای اکسیدکننده ورودی کاسته می‌شود. در واقع می‌توان گفت که در این شرایط مقدار بیشینه دمایی به ازای حداقل مقدار CO_2 تزریق شده جهت دستیابی به احتراق بدون شعله تقریباً ثابت بوده و مقداری حدود ۱۷۵۰ کلوین دارد. با این حال بررسی توزیع دما در مقادیر پیش‌گرمایش مختلف نشان دهنده آن است که در دماهای پیش‌گرمایش بالاتر اگرچه دمای بیشینه تقریباً مشابهی با دماهای پیش‌گرمایش پایین بدست می‌آید، اما متوسط دمایی بالاتر بوده و شاهد توزیع دمایی یکنواخت‌تری هستیم. برای دستیابی به توزیع دماهای یکنواخت‌تر در دماهای پیش‌گرمایش پایین‌تر می‌توان مقدار دی‌اکسید کربن را درون مخلوط احتراقی حداکثر تا مقادیر نشان داده شده در شکل ۱۳ افزایش داد که این موضوع سبب کاهش بیشینه و متوسط دمای احتراقی نسبت به حالتی می‌شود که پیش‌گرمایش به میزان بیشتری صورت گرفته است.



شکل ۱۳- حداقل میزان دی‌اکسید کربن لازم برای دستیابی به احتراق بدون شعله و اختلاف دمای میان بیشینه دمای احتراقی و دمای اکسیدکننده ورودی

۶- جمع بندی

در مطالعه حاضر به بررسی عددی تاثیر تزریق دی‌اکسید کربن

MILD combustion, *Combustion Science and Technology*, Vol. 184, No. 7-8, pp. 1207-1218, 2012.

- [13] De Joannon M., Sorrentino G., Cavaliere A., MILD combustion in diffusion-controlled regimes of hot diluted fuel, *Combustion and Flame*, Vol. 159, No. 5, pp. 1832-1839, 2012.
- [14] Song Y., Zou C., He Y., Zheng C., The chemical mechanism of the effect of CO₂ on the temperature in methane oxy-fuel combustion, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 86, pp. 622-628, 2015.
- [15] P. Sabia, G. Sorrentino, A. Chinnici, A. Cavaliere, R. Ragucci, Dynamic behaviors in methane MILD and oxy-fuel combustion. Chemical effect of CO₂, *Energy & Fuels*, Vol. 29, No. 3, pp. 1978-1986, 2015.
- [16] Kwiatkowski K., Mastorakos E., Regimes of Nonpremixed Combustion of Hot Low-Calorific-Value Gases Derived from Biomass Gasification, *Energy & Fuels*, 2016.
- [17] Abdelbaki M., Tabet F., Hadeif A., MILD combustion of hydrogenated biogas under several operating conditions in an opposed jet configuration, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017.
- [18] Cheong KP., Li P., Wang F., Mi J., Emissions of NO and CO from counter flow combustion of CH₄ under MILD and oxy fuel conditions, *Energy*, Vol. 124, pp. 652-664, 2017.
- [19] E. Ranzi, A. Frassoldati, R. Grana, A. Cuoci, T. Faravelli, A. Kelley, C. Law, Hierarchical and comparative kinetic modeling of laminar flame speeds of hydrocarbon and oxygenated fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 38, No. 4, pp. 468-501, 2012.
- [20] de Joannon M., Sabia P., Tregrossi A., Cavaliere A., Periodic regimes in low molecular weight paraffin oxidation, in *Proceeding of*.
- [21] Sabia P., de Joannon M., Picarelli A., Chinnici A., Ragucci R., Modeling Negative Temperature Coefficient region in methane oxidation, *Fuel*, Vol. 91, No. 1, pp. 238-245, 2012.
- [22] Cheng Z., Wehrmeyer J. A., Pitz R. W., Experimental and numerical studies of opposed jet oxygen-enhanced methane diffusion flames, *Combustion science and technology*, Vol. 178, No. 12, pp. 2145-2163, 2006.
- [23] Peters N., *Combustion theory*, CEFRC Summer school, Princeton, June 28th–July 2nd, 2010.
- [24] Sorrentino G., Characterization of advected-surfaces. The sinews of a “MultiSECTIONing” approach for non-premixed combustion, 2013.

نرخ واکنش گونه (kgm⁻³)

ω

بالانویس ها

Th

حرارتی

زیر نویس ها

F

سوخت

fu

جریان سوخت

in

ورودی اکسیدکننده

k

شمارنده

km

متوسط مخلوط

st

استوکیومتری

ox

جریان اکسیدکننده

۸- مراجع

- [1] Bouzalakos S., Maroto-Valer M., *Overview of carbon dioxide (CO₂) capture and storage technology, Development and innovation in carbon dioxide (CO₂) capture and storage technology*, Vol. 2, pp. 1-24, 2010.
- [2] Maroto-Valer M. M., *Developments and Innovation in Carbon Dioxide (CO₂) Capture and Storage Technology: Carbon Dioxide (CO₂) Storage and Utilisation*: Elsevier, 2010.
- [3] Cavaliere A., de Joannon M., Mild combustion, *Progress in Energy and Combustion science*, Vol. 30, No. 4, pp. 329-366, 2004.
- [4] Li P., Dally B. B., Mi J., Wang F., MILD oxy-combustion of gaseous fuels in a laboratory-scale furnace, *Combustion and Flame*, Vol. 160, No. 5, pp. 933-946, 2013.
- [5] Li P., Mi J., Dally B., Wang F., Wang L., Liu Z., Chen S., Zheng C., Progress and recent trend in MILD combustion, *Science China Technological Sciences*, Vol. 54, No. 2, pp. 255-269, 2011.
- [6] Dally B. B., Riesmeier E., Peters N., Effect of fuel mixture on moderate and intense low oxygen dilution combustion, *Combustion and flame*, Vol. 137, No. 4, pp. 418-431, 2004.
- [7] Li P., Mi J., Dally B. B., Craig R. A., Wang F., Premixed moderate or intense low-oxygen dilution (MILD) combustion from a single jet burner in a laboratory-scale furnace, *Energy & Fuels*, Vol. 25, No. 7, pp. 2782-2793, 2011.
- [8] Lille S., Blasiak W., Jewartowski M., Experimental study of the fuel jet combustion in high temperature and low oxygen content exhaust gases, *Energy*, Vol. 30, No. 2, pp. 373-384, 2005.
- [9] De Joannon M., Sabia P., Sorrentino G., Cavaliere A., Numerical study of mild combustion in hot diluted diffusion ignition (HDDI) regime, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, No. 2, pp. 3147-3154, 2009.
- [10] Seepana S., Jayanti S., Flame structure investigations of oxy-fuel combustion, *Fuel*, Vol. 93, pp. 52-58, 2012.
- [11] S. Chen, C. Zheng, Counterflow diffusion flame of hydrogen-enriched biogas under MILD oxy-fuel condition, *International journal of hydrogen energy*, Vol. 36, No. 23, pp. 15403-15413, 2011.
- [12] M. De Joannon, P. Sabia, G. Cozzolino, G. Sorrentino, A. Cavaliere, Pyrolytic and oxidative structures in hot oxidant diluted oxidant (HODO)