



## مطالعه عددی ساختار و پایداری احتراق متان-هوا و متان-اکسیژن در یک شعله لوله‌ای غیر پیش‌آمیخته و مغشوش

مهدی بردبار<sup>1</sup>، هادی پاسدارشهری<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14115-111، pasdar@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 14 مهر 1395  
پذیرش: 11 آذر 1395  
ارائه در سایت: 05 دی 1395  
کلید واژگان:  
شعله لوله‌ای  
احتراق  
شعله غیر پیش‌آمیخته  
پایداری

در دهه اخیر، شعله‌های لوله‌ای به دلیل هندسه خاص، مورد توجه قرار گرفته‌اند. مزیت بزرگ شعله‌های لوله‌ای نسبت به سایر شعله‌ها، توزیع یکنواخت دما است. در نتیجه تشکیل نوسانات حرارتی در محفظه احتراق کاهش می‌یابد. در این مقاله یک شعله لوله‌ای غیر پیش‌آمیخته تحت شرایط عملکردی مختلف به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی عددی حلگری در نرم‌افزار متن باز این فوم توسعه داده شده و نتایج عددی به دست آمده با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده است. حل عددی و داده‌های تجربی از مطابقت خوبی برخوردار است. همچنین، توزیع دما و غلظت گونه‌های مهم احتراق در میانه محفظه احتراق به کمک سه سینتیک یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و DRM22 مقایسه شده و پایداری شعله در شرایط عملکردی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که زمانی که احتراق در حضور هوا انجام پذیرد، با افزایش کسر مولی اکسیژن، ناحیه پایداری شعله باریک شده و شعله در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک به حد خاموشی شعله، به صورت پایداری تشکیل می‌شود. اگر از اکسیژن خالص به عنوان اکسیدکننده استفاده شود، شعله در نسبت‌های هم‌ارزی بین 0.1 تا 0.2 پایداری می‌شود و دمای شعله بسیار افزایش می‌یابد. برای کنترل دمای شعله، دی‌اکسیدکربن از محصولات خروجی به اکسیدکننده اضافه می‌شود. در ادامه اثرات اضافه کردن دی‌اکسیدکربن بر محدوده پایداری شعله مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که با کاهش کسر مولی اکسیژن، محدوده پایداری شعله افزایش می‌یابد.

## A numerical study on the flame structure and stability of non-premixed methane-air and methane-oxygen turbulent tubular flame

Mehdi Bordbar, Hadi Pasdarshahri\*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
\* P.O.B. 14115111 Tehran, Iran, pasdar@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 06 October 2016  
Accepted 02 December 2016  
Available Online 25 December 2016

### Keywords:

Tubular Flame  
Combustion  
Non-premixed Flame  
Stability

### ABSTRACT

Recently, tubular flames have been considered due to their advantages in geometry of the flame. The major importance of tubular flame is its uniform temperature distribution. Therefore, it may reduce thermal fluctuations along the combustion chamber. In this paper, a non-premixed tubular flame is simulated numerically under various operational conditions. A solver is developed in openFOAM and numerical results are validated against the experimental measurements. Also, temperature distribution and concentration of major species of the flame in the middle of the burner are investigated and compared using global, two-step and DRM22 as chemical kinetics. In addition, stability of the flame in air presence as oxidizer has been studied. Results show that by increasing oxygen mole fraction in oxidizer, the equivalence ratio of the steady tubular flame region decreases and the flame will be established uniformly in equivalence ratio near the extinction limit. If pure oxygen is used as oxidizer, flame temperature will increase considerably and tubular flame can be stable for equivalence ratio between 0.1 and 0.2. Thereupon carbon dioxide from the flue gases is added to the oxidizer to control the flame temperature changes. Establishment of steady tubular flame in presence of carbon dioxide is simulated too. Results show that by decreasing oxygen mole fraction, the equivalence ratio of the steady tubular flame region increases and the stability zone becomes wider.

### 1- مقدمه

شعله در طول آن ثابت باقی می‌ماند [1]. مزیت بزرگ شعله‌های لوله‌ای با توجه به مطالعات پیشین، توزیع حرارت یکنواخت در محفظه احتراق است. در بسیاری از شعله‌ها مشاهده شده که دمای شعله در همه جای آن یکسان نیست در نتیجه انتقال حرارت به صورت غیریکنواخت انجام می‌شود؛ اما در

شعله‌های لوله‌ای<sup>1</sup> به شعله‌ای اطلاق می‌شود که سطح مقطع آن دایره‌ای بوده و در واقع به صورت یک استوانه توخالی شکل می‌گیرد. در این شعله‌ها شعاع

<sup>1</sup> Tubular Flame

### Please cite this article using:

M. Bordbar, H. Pasdarshahri, A numerical study on the flame structure and stability of non-premixed methane-air and methane-oxygen turbulent tubular flame, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 562-570, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

لویس سوخت برابر یا بیشتر از یک باشد، اثر انحنای بر دما کاهش می‌یابد [10]. شوپوف و همکارانش به بررسی تجربی ناپایداری سلولی در شعله لوله‌ای غیر پیش‌آمیخته پرداختند. ایشان مشاهده کردند که با افزایش سرعت ورودی سوخت، شعله لوله‌ای ابتدا گسسته شده و کاملاً ساختار سلولی پیدا کرده و با ادامه افزایش سرعت، سلول‌ها کوچک‌تر شده و شعله در انتها خاموش می‌شود [11]. ایشیزوکا و همکارانش به صورت تجربی به بررسی پایداری شعله لوله‌ای غیر پیش‌آمیخته در میدان جریان چرخشی پرداختند. در این مطالعه ناحیه‌هایی که شعله لوله‌ای به صورت پایدار درمی‌آید، به کمک نمودار نسبت هم‌ارزی برحسب کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده، نشان داده شد [12]. ایشان همچنین به بررسی تأثیر رقیق‌کننده دی‌اکسیدکربن در احتراق اکسیژن- سوخت بر تشکیل و پایداری شعله لوله‌ای پرداختند و نتایج به دست آمده را با حالتی که از احتراق هوا- سوخت استفاده شده است، مقایسه کردند. طبق نتایج به دست آمده، در احتراق سوخت- اکسیژن با افزایش کسر مولی دی‌اکسیدکربن، شعله لوله‌ای در محدوده بزرگتری از نسبت هم‌ارزی به صورت پایدار تشکیل می‌شود [6]. هوری و همکاران به صورت تجربی به بررسی شعله لوله‌ای در یک محفظه احتراق دو مرحله‌ای پرداختند. در این آزمایش از دو محفظه احتراق اصلی و ثانویه استفاده شده که محفظه اصلی، شعله لوله‌ای ایجاد می‌کند و محفظه ثانویه از نوع مشعل چرخشی<sup>2</sup> می‌باشد. نحوه عملکرد این محفظه احتراق به این صورت است که سوخت و اکسیدکننده به محفظه اصلی وارد شده و شعله لوله‌ای را تشکیل می‌دهند. سپس محصولات احتراق به همراه سوخت و اکسیدکننده، به محفظه احتراق ثانویه وارد می‌شوند. طبق نتایج به دست آمده، غلظت اکسیدهای نیتروژن در این حالت تنها 10 ppm بوده که مقدار آن 0.1 غلظت آن در حالت شعله لوله‌ای یک مرحله‌ای می‌باشد [13].

در پژوهش حاضر شعله لوله‌ای غیر پیش‌آمیخته در میدان جریان چرخشی به صورت عددی شبیه‌سازی شده است و ساختار آن تعیین شده است. در مرحله اول از هوا به عنوان اکسیدکننده استفاده شده و محدوده پایداری شعله لوله‌ای در کسرهای مولی مختلف اکسیژن موجود در اکسیدکننده مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله دوم از اکسیژن به عنوان اکسیدکننده و دی‌اکسیدکربن به عنوان رقیق‌کننده استفاده شده است. در این بررسی، علاوه بر فرایند احتراق، انتقال حرارت تشعشی درون محفظه احتراق، لحاظ شده است. همچنین از سینتیک‌های یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و DRM22 برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

برای این کار حلگری در نرم‌افزار توسعه داده شده است. مسأله حاضر یک نمونه آزمایشگاهی دارد که ایشیزوکا [12,6] آن را انجام داده و از نتایج آن برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده، استفاده شده است. میدان محاسباتی این مسأله یک محفظه احتراق استوانه‌ای سه‌بعدی بوده که سوخت و اکسیدکننده به صورت جداگانه از شیارهای مماسی در ابتدای محفظه، وارد شده و شعله لوله‌ای را تشکیل می‌دهند. در این پژوهش ساختار و محدوده پایداری شعله لوله‌ای در میدان جریان مغشوش، برای اولین بار به صورت عددی شبیه‌سازی شده است.

## 2- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای شبیه‌سازی شعله لوله‌ای غیر پیش‌آمیخته شامل بقای جرم، بقای مومنتم، بقای انرژی و بقای گونه‌ها می‌باشد. برای محاسبات

شعله‌های لوله‌ای با توجه به هندسه آن این عیب برطرف شده و توزیع دما نسبت به محور محفظه احتراق به صورت متقارن است [2]. بنابراین دمای شعله در همه جای آن تقریباً یکسان بوده و انتقال حرارت به صورت یکنواخت انجام می‌شود. با این مزیت بزرگ در شعله لوله‌ای نوسانات حرارتی و نقاط داغ<sup>1</sup> درون محفظه احتراق تشکیل نشده و دمای بیشینه شعله کاهش می‌یابد. با کاهش دمای بیشینه، تشکیل اکسیدهای نیتروژن به شدت کاهش می‌یابد. از طرفی این شعله‌ها به وسیله مخلوط نسوخته محصور شده‌اند و با دیواره محفظه احتراق تماس ندارند. در نتیجه اتلاف حرارت از طریق دیواره محفظه احتراق به شدت کاهش می‌یابد [3].

شعله‌های لوله‌ای به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول شعله‌های لوله‌ای در میدان جریان واکنشی چرخشی و دسته دوم شعله‌های لوله‌ای در میدان جریان واکنشی غیر چرخشی است. در دسته اول سوخت و اکسیدکننده به طور مماسی وارد محفظه احتراق می‌شود. در این حالت با ورود مماسی سوخت و اکسیدکننده به محفظه احتراق، جریان چرخشی در محفظه شکل گرفته و شعله لوله‌ای را پدید می‌آورد. در دسته دوم سوخت و اکسیدکننده به صورت شعاعی و با عبور از یک سطح متخلخل به محفظه احتراق وارد شده و شعله لوله‌ای تشکیل می‌شود [4].

از جمله کاربردهای خاص شعله لوله‌ای می‌توان به پیش‌گرم کردن هوا با عبور لوله حاوی جریان هوا از وسط شعله لوله‌ای [3]، گرمایش یکنواخت در سر موتور استرلینگ [3]، استفاده از شعله لوله‌ای به عنوان پیولوت برای پایداری شعله با سرعت جریان بالا [5]، انواع کوره و بویلر اشاره کرد.

محصولات احتراق در سوخت‌های هیدروکربنی، ممکن است آسیب‌های زیست محیطی فراوانی را به همراه داشته باشند. به عنوان مثال دی‌اکسیدکربن یکی از گازهای گلخانه‌ای بوده که گرمایش زمین را در پی دارد و اکسید نیتروژن آسیب جدی به لایه ازن وارد کرده است [6]. امروزه، استفاده از اکسیژن خالص به عنوان اکسیدکننده در مقایسه با احتراق‌هایی که از هوا به عنوان اکسیدکننده استفاده می‌کنند، مزیت‌های قابل توجهی دارد. از جمله این مزایا می‌توان به کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن و تسهیل به دام انداختن و تجزیه دی‌اکسیدکربن اشاره کرد [7].

با توجه به این‌که احتراق اکسیژن- سوخت منجر به بالا رفتن بیش از حد دما شده، معمولاً ترکیبی از اکسیژن و گونه‌ای از محصولات خروجی به عنوان اکسیدکننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین دی‌اکسیدکربن ذخیره شده به اکسیژن در اکسیدکننده اضافه می‌شود. دلیل اصلی اضافه کردن دی‌اکسید کربن به اکسیژن، کاهش دمای احتراق می‌باشد [8].

پیتر و همکارانش به مطالعه تجربی و عددی شعله لوله‌ای پیش‌آمیخته آرام در میدان جریان غیر چرخشی پرداختند. در مطالعه تجربی از روش پراکندگی رامان و در مطالعه عددی از کد توسعه یافته آدیدف استفاده شده است. در این مطالعه، توزیع دما و غلظت گونه‌های مهم احتراق به دست آمد و مطابقت قابل قبولی بین نتایج عددی و داده‌های تجربی وجود داشت [9]. ایشان همچنین به مطالعه تجربی شعله لوله‌ای غیر پیش‌آمیخته آرام در میدان جریان غیر چرخشی نیز پرداختند و برای بررسی تأثیر انحنای بر ساختار شعله، توزیع دمای آن را با توزیع دمای یک شعله مسطح خلاف جهت مقایسه کردند. طبق نتایج به دست آمده در شرایطی که عدد لویس سوخت کمتر از یک باشد، انحنای به شدت بر دمای شعله اثر گذاشته و دمای شعله نسبت به شعله مسطح خلاف جهت در حدود 80 K کمتر است. در حالتی که عدد

<sup>2</sup> Swirl burner

<sup>1</sup> Hot Spot

3-2- مدل تشعشعی

هدف از حل معادله انتقال تشعشع، محاسبه جمله چشمه تشعشع در معادله بقای انرژی و تعیین شار حرارت تشعشعی روی مرزها است. حلگر ریکتینگ-فوم تشعشع را در نظر نگرفته است. به این ترتیب باید جمله چشمه تشعشع به معادله بقای انرژی در این حلگر اضافه شود [17]. این کار با اضافه کردن جمله چشمه تشعشع به معادله بقای انرژی و به صورت معادله (5) انجام می‌شود.

$$Sh(O) = R_u(O) - R_p(O)T^4 \quad (5)$$

در معادله (5)،  $T$  دما و  $R_u$  و  $R_p$  توابعی هستند که با توجه به مدل تشعشعی مورد استفاده در حلگر تعریف می‌شوند. در پژوهش حاضر از مدل p-1 برای تشعشع استفاده شده است. این مدل برای محفظه‌های احتراق با هندسه‌های پیچیده، پاسخ‌های مناسبی ارائه می‌دهد و در شبیه‌سازی فرایندهای احتراقی مورد توجه قرار گرفته است [18]. همچنین با توجه به وجود گونه‌های  $H_2O$  و  $CO_2$  در محصولات احتراق، از مدل گاز خاکستری برای شبیه‌سازی رفتار تشعشعی گازهای موجود استفاده شده است.

4-2- هندسه مورد بررسی

هندسه‌ای که در آن شعله لوله‌ای شبیه‌سازی شده، در "شکل 1" آورده شده است. این هندسه یک محفظه احتراق سه‌بعدی را نشان می‌دهد که در آن سوخت و اکسیدکننده به صورت جداگانه از شیارهای تعبیه شده در ابتدای محفظه، به صورت مماسی به ناحیه واکنش وارد شده و شعله لوله‌ای را تشکیل می‌دهند. ابعاد میدان محاسباتی هندسه موردنظر در جدول 1 آمده است. دمای ورودی سوخت و اکسیدکننده 298 K و فشار 101325 Pa است. اکسیدکننده با دبی حجمی ثابت  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  به صورت مماسی به محفظه احتراق وارد می‌شوند. در مرحله اول از هوا به عنوان اکسیدکننده استفاده شده و با تغییر کسر مولی اکسیژن، ناحیه پایداری شعله لوله‌ای تعیین می‌شود. در این حالت در یک کسر مولی ثابت، با تغییر سرعت ورودی سوخت، مقدار نسبت هم‌ارزی را کنترل کرده و در هر نسبت هم‌ارزی امکان تشکیل شعله لوله‌ای پایدار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در مرحله دوم از اکسیژن خالص به عنوان اکسیدکننده همراه با دی‌اکسیدکربن به عنوان رقیق کننده استفاده می‌شود. در این مرحله نیز روش کار دقیقاً مانند مرحله قبل بوده و در هر کسر مولی، امکان تشکیل شعله لوله‌ای پایدار در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول 2 مقدار سرعت ورودی سوخت، نسبت هم‌ارزی و کسر مولی اکسیژن موجود در اکسیدکننده در هر مرحله آورده شده است.

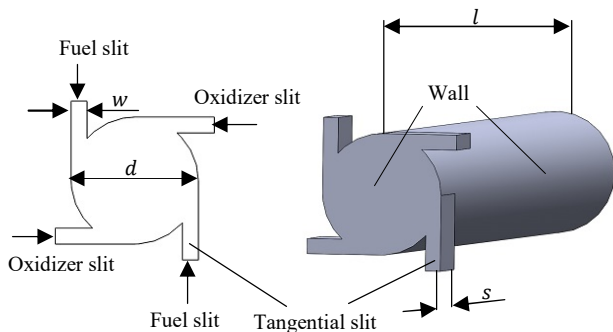


Fig. 1 Tubular flame burner

شکل 1 محفظه احتراق شعله لوله‌ای

جریان با چگالی متغیر از روش متوسط‌گیری جرمی استفاده شده است. معادلات حاکم طی روابط (1) تا (4) آمده است.

➤ معادله بقای جرم

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

➤ معادله انتقال مومنتم

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (2)$$

➤ معادله بقای انرژی

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{h}_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{h}_s)}{\partial x_i} = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{h}_s}{\partial x_i} \right) + \bar{q} + Sh + STh \quad (3)$$

➤ معادله بقای جرم گونه  $k$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{Y}_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{Y}_k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} D_{\text{eff},k}^m \frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial x_i} \right) + \bar{\omega}_k \quad (4)$$

در روابط بالا،  $\bar{\rho}$  چگالی،  $\bar{u}$  بردار سرعت،  $\bar{p}$  فشار،  $\mu_{\text{eff}}$  لزجت دینامیکی مؤثر،  $\bar{h}_s$  انتالپی محسوس،  $\alpha_{\text{eff}}$  ضریب نفوذ حرارتی مؤثر،  $\bar{q}$  نرخ متوسط گرمای حاصل از احتراق،  $\bar{Y}_k$  کسر جرمی گونه  $k$ ،  $D_{\text{eff},k}^m$  ضریب نفوذ جرمی مؤثر گونه  $k$ ،  $Sh$  جمله چشمه تشعشع،  $STh$  جمله چشمه جرقه و  $\bar{\omega}_k$  نرخ متوسط واکنش گونه  $k$  است.

1-2- مدل اغتشاشی

برای شبیه‌سازی اغتشاش جریان از مدل دو معادله‌ای کی-امگا اس‌اس‌تی استفاده شده است. در این مدل برای هر یک از متغیرهای انرژی جنبشی اغتشاشی  $k$  و فرکانس  $\omega$  یک معادله انتقال حل می‌شود و لزجت اغتشاشی را به وسیله آن دو متغیر، طبق مدل بوزینسک تخمین می‌زند [14]. این مدل ترکیبی از دو مدل کی-اِپسیلون و کی-امگا بوده و به این صورت است که در نزدیکی دیواره از مدل کی-امگا و در ناحیه خارج از لایه مرزی از مدل کی-اِپسیلون استفاده می‌کند. این مدل در جریان‌های چرخشی و رینولدز پایین بسیار مناسب بوده و پاسخ‌های دقیقی ارائه می‌دهد [15]. با توجه به مشخصات هندسه شعله لوله‌ای در این پژوهش که هم در میدان جریان چرخشی تشکیل می‌شود و هم رینولدز پایینی دارد، از این مدل برای شبیه‌سازی اغتشاش استفاده شده است.

2-2- مدل احتراقی

مدل احتراقی برای بیان نرخ واکنش متوسط‌گیری شده، به کار می‌رود و روابطی را برای تعیین شار گونه‌های شیمیایی تعیین می‌کند [14]. در شبیه‌سازی احتراق غیر پیش‌آمیخته می‌توان از مفهوم اتلاف گردابه<sup>1</sup> و واکنشگاه نیمه مخلوط<sup>2</sup> برای محاسبه نرخ احتراق، استفاده نمود. در پژوهش حاضر از مدل احتراقی واکنشگاه نیمه مخلوط استفاده شده است. در مدل واکنشگاه نیمه مخلوط، هر سلول محاسباتی به دو ناحیه واکنشی و غیر واکنشی همگن تقسیم شده و نرخ انجام واکنش در حالت گذرا محاسبه می‌شود. در این مدل، اندازه قسمت واکنشی در مرتبه زیرشبکه‌ها بوده و به صورت یک واکنشگاه اختلاط ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. در قسمت واکنشی، واکنش به صورت کامل انجام شده و غلظت متوسط در هر سلول در اثر تبادل جرم بین ناحیه واکنشی و غیر واکنشی تغییر می‌کند [16].

<sup>1</sup> Eddy dissipation concept (EDC)

<sup>2</sup> Partially stirred reactor (PaSR)

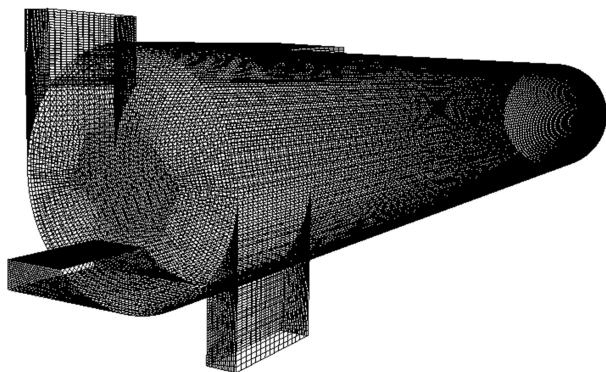


Fig. 2 Grid of computational field

شکل 2 شبکه‌بندی میدان محاسباتی

احتراق غیر پیش‌آمیخته آشفته با استفاده از مدل احتراقی واکنش‌گاه نیمه مخلوط و بدون در نظر گرفتن تشعشع را دارا است. در این کد از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات حاکم استفاده شده است. گسسته‌سازی عبارتهای زمانی با روش اویلر مرتبه اول و گسسته‌سازی مکانی سایر پارامترها با دقت مرتبه دو صورت گرفته است. در این حلگر برای حل مشکل جفت‌شدگی میدان‌های فشار و سرعت از الگوریتم پیمپل<sup>۳</sup> برای تصحیح فشار استفاده شده است. این الگوریتم ترکیبی از دو الگوریتم سیمپل<sup>۴</sup> و پیزو<sup>۵</sup> می‌باشد. در دو الگوریتم سیمپل و پیزو، ابتدا میدان حل اولیه پیش‌بینی شده و سپس تصحیح می‌شود. با این تفاوت که در الگوریتم سیمپل عملیات تصحیح فقط یک بار انجام می‌شود و در مسائل پایا به کار می‌رود در حالی که در الگوریتم پیزو، عملیات تصحیح دو بار انجام می‌شود و برای حل جریان‌های گذرا استفاده شده و به همین دلیل از عملیات زیر تخفیف<sup>۶</sup> استفاده نمی‌کند. در الگوریتم پیمپل که برای مسائل گذرا به کار می‌رود، می‌توان در حین حل از گام‌های زمانی بزرگتری در حین همگرایی مناسب استفاده کرد. در این الگوریتم، هم می‌توان عملیات تصحیح را چندین بار انجام داد و هم برای همگرایی از عملیات زیر تخفیف بهره برد. البته عملیات زیر تخفیف در آخرین مرحله تکرار در هر گام زمانی غیرفعال شده است. مقدار باقی‌مانده برای همگرایی حل معادلات  $1 \times 10^{-6}$  در نظر گرفته شده است.

#### 4- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است.

#### 4-1- استقلال از شبکه

برای حل مسأله ابتدا عدم وابستگی حل عددی به شبکه محاسباتی بررسی شد. 4 شبکه با تعداد سلول 120000، 360000، 720000 و 1200000 انتخاب و نتایج حل روی هر کدام مقایسه شد. "شکل 3"، توزیع دما در یک مقطع در میانه محفظه احتراق را با استفاده از شبکه‌بندی‌های انجام شده نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار پیداست، نتایج دو شبکه 720000 و 1200000 تفاوت بسیار کمی با یکدیگر دارند و تقریباً روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. بنابراین شبکه با تعداد 720000 سلول برای حل عددی انتخاب شده است.

جدول 1 ابعاد محفظه احتراق

اندازه (mm)	پارامتر
100	طول محفظه (l)
16	قطر محفظه احتراق (d)
2	عرض شیار ورودی (s)
8	ارتفاع شیار ورودی (w)

جدول 2 شرایط عملکردی

$\beta$	$\phi$	$V_f$ (m/s)
0.21	0.4	7.29
	0.5	9.11
	0.9	16.41
	1.0	18.23
0.40	0.2	6.94
	0.3	13.89
	0.9	31.25
	1.0	34.72
0.60	0.1	5.21
	0.2	10.42
	0.4	20.83
	0.5	26.05
0.80	0.1	6.95
	0.2	13.89
	0.3	20.83
	0.4	27.78
1.00	0.1	8.68
	0.2	17.36
	0.3	26.04

در این پژوهش برای شروع واکنش‌های شیمیایی، فرایند جرقه شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی جرقه در محفظه احتراق، به این صورت عمل می‌شود که یک ترم چشمه به معادله انرژی اضافه می‌شود. این ترم چشمه به قدرت جرقه، مکان اعمال جرقه، زمان شروع و مدت زمان اعمال آن وابسته می‌باشد. با تعیین موارد فوق، دما در سلول‌های مشخص شده، در مدت زمان مشخص شده، افزایش یافته و فرایند جرقه شبیه‌سازی می‌شود.

میدان محاسباتی با توجه به "شکل 2" به‌صورت شبکه با سازمان<sup>۱</sup> تقسیم و شبکه‌بندی شده است. برای افزایش دقت نتایج، شبکه‌بندی در ناحیه‌هایی که تغییرات زیاد است، ریزتر می‌باشد.

در مطالعه تجربی، در قسمت دیواره محفظه احتراق، از شیشه کوارتز استفاده شده است که ضریب انتقال هدایت آن 3 W/m.K است که بسیار کم می‌باشد. به همین دلیل می‌توان دیواره‌های محفظه احتراق را عایق گرفت. همچنین شرط مرزی عدم لغزش بر روی دیواره‌ها اعمال شده است. مرز خروجی دارای فشار نسبی صفر می‌باشد. برای شرط مرزی اغتشاش، مقدار شدت اغتشاش با توجه به فیزیک مسأله برابر با 5 درصد انتخاب شده و مقدار طول اختلاط با توجه به هندسه مسأله محاسبه می‌شود.

#### 3- روش حل عددی

در کار حاضر، شبیه‌سازی عددی شعله لوله‌ای به‌صورت سه‌بعدی و با استفاده از حلگر توسعه یافته در نرم‌افزار متن باز این‌فوم صورت پذیرفته است. این حلگر که بر مبنای حلگر روریکتینگ‌فوم<sup>۲</sup> بوده، قابلیت شبیه‌سازی

<sup>3</sup> PIMPLE

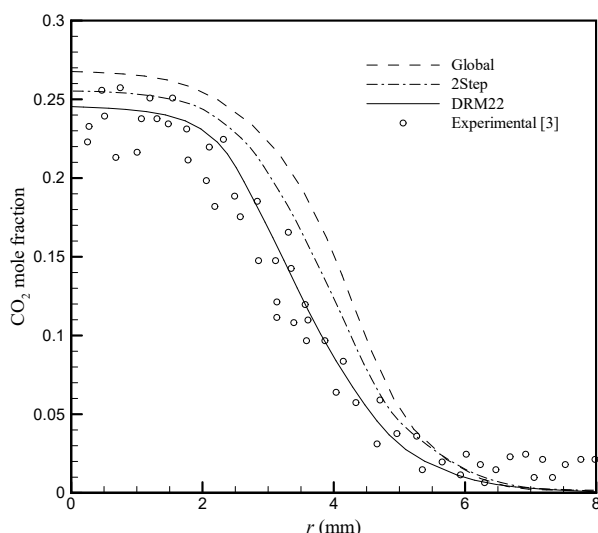
<sup>4</sup> SIMPLE

<sup>5</sup> PISO

<sup>6</sup> under relaxation

<sup>1</sup> Structure grid

<sup>2</sup> rhoReactingFoam



**Fig. 5** Comparison of radial distribution of CO<sub>2</sub> mole fraction with different kinetics using CH<sub>4</sub>/air in the middle of combustion chamber  
 شکل 5 مقایسه توزیع شعاعی گونه دی‌اکسیدکربن در سینتیک‌های مختلف در حالت استفاده از متان-هوا در مقطع میانی محفظه احتراق

با استفاده از سینتیک دو مرحله‌ای، مقدار دمای پیش‌بینی شده برابر با 1747 K بوده و مقدار خطا در این حالت 9 درصد می‌باشد. این در حالی است که با استفاده از سینتیک DRM22 نمودار توزیع دما به خوبی با نتایج تجربی موجود تطابق داشته و دمای شعله را به خوبی پیش‌بینی کرده است.

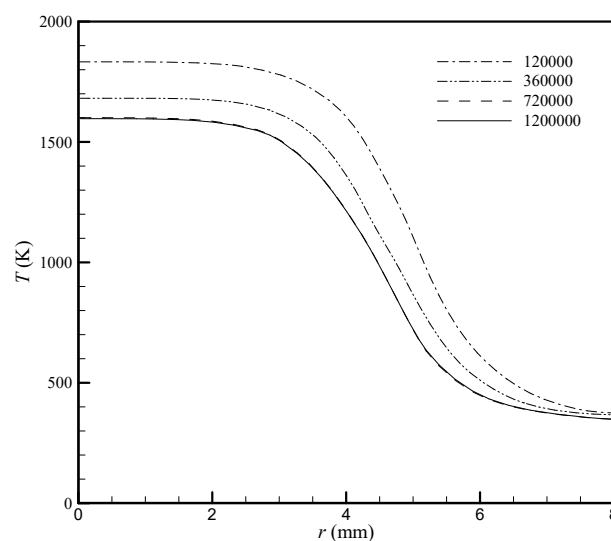
دمای شعله در این حالت 1604 K پیش‌بینی شده است. از نمودار دما می‌توان برای محاسبه ضخامت ناحیه واکنش استفاده کرد. ناحیه واکنش ناحیه‌ای است که نرخ انجام واکنش در آن صفر نباشد [14]. با پیش‌روی از دیواره محفظه احتراق در راستای شعاعی، ناحیه‌ای که تغییرات شعاعی دما، آغاز شود تا جایی که این تغییرات دوباره به صفر برسد، ناحیه واکنش نامیده می‌شود. با توجه به شکل مشخص است که ضخامت ناحیه واکنش در حدود 4 mm می‌باشد. با توجه به "شکل 4" مشخص است که دما در قسمت مرکزی محفظه احتراق ثابت است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که توزیع دما در داخل شعله به صورت یکنواخت انجام می‌شود.

"شکل 5" نمودار توزیع گونه دی‌اکسیدکربن در همان مقطع را نشان می‌دهد. در این نمودار نیز مشخص است که سینتیک یک مرحله‌ای مقدار دی‌اکسیدکربن را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده و مقدار خطا در این حالت نسبت به نتایج تجربی 8 درصد می‌باشد. با استفاده از سینتیک دو مرحله‌ای مقدار خطا نسبت به نتایج تجربی در حدود 4 درصد می‌باشد. این در حالی است که با استفاده از سینتیک DRM22 مقدار دی‌اکسیدکربن با حالت واقعی تطابق مناسبی داشته است و مقدار پیش‌بینی شده در این حالت برابر با 0.246 می‌باشد. همان‌گونه که در این نمودار مشخص است در  $r=8$  mm که مواد واکنش‌دهنده هنوز به ناحیه واکنش وارد نشده‌اند، مقدار دی‌اکسیدکربن صفر بوده و با نزدیک شدن به این ناحیه و بر اثر انجام واکنش، دی‌اکسیدکربن تولید شده و مقدار آن در محصولات احتراق در ناحیه داخلی شعله به بیشینه می‌رسد.

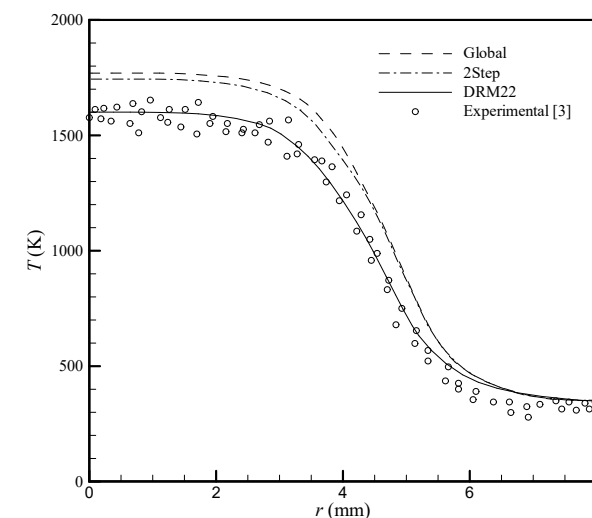
در "شکل 6" نیز نمودار توزیع گونه مونوکسیدکربن در مقطع میانی محفظه احتراق و با استفاده از دو سینتیک دو مرحله‌ای و DRM22 نشان داده شده است. با استفاده از سینتیک دو مرحله‌ای مقدار بیشینه گونه مونوکسیدکربن برابر با 0.04 پیش‌بینی شده در حالی که مقدار تجربی آن

#### 2-4- مقایسه سینتیک‌های یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و DRM22

پس از انجام عدم وابستگی حل عددی به شبکه و یافتن شبکه مناسب، نتایج حل عددی با استفاده از سه سینتیک یک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و DRM22 با داده‌های تجربی مقایسه شده است. زمان انجام محاسبات با استفاده پردازنده 8 هسته‌ای با سرعت 3.4 GHz و 16 GB حافظه موقت، در این سینتیک‌ها به ترتیب 18، 25 و 70 ساعت می‌باشد. در "شکل 4" توزیع دمای شعله در مقطع میانی محفظه و عمود بر محور طولی نشان داده شده است. منظور از مقطع میانی،  $z=50$  mm می‌باشد. همان‌طور که در این شکل پیداست، با استفاده از سینتیک یک مرحله‌ای، مقدار دمای شعله بیشتر از مقدار اصلی پیش‌بینی شده و مقدار متوسط خطای محاسبه شده در میدان حل 11 درصد است. مقدار دمای پیش‌بینی شده با استفاده از سینتیک یک مرحله‌ای 1780 K و مقدار دمای شعله در مطالعه تجربی 1605 K می‌باشد.



**Fig. 3** Comparison of temperature radial distribution with different grids using CH<sub>4</sub>/air in the middle of combustion chamber  
 شکل 3 توزیع شعاعی دما: مقایسه کار عددی در شبکه‌های مختلف در حالت استفاده از متان-هوا در مقطع میانی محفظه احتراق



**Fig. 4** Temperature radial distribution with different chemical kinetics using CH<sub>4</sub>/air in the middle of combustion chamber  
 شکل 4 توزیع شعاعی دما: مقایسه کار عددی در سینتیک‌های مختلف در حالت استفاده از متان-هوا در مقطع میانی محفظه احتراق

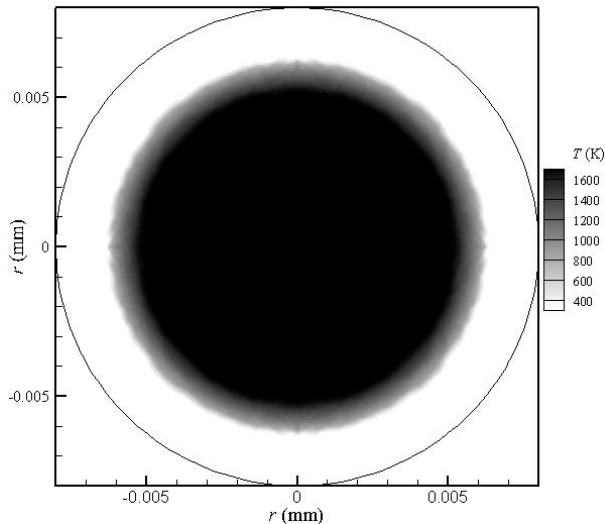


Fig. 7 Isothermal contour for equivalence ratio 0.6 using  $\text{CH}_4/\text{air}$  in the middle of combustion chamber

شکل 7 کانتور دما برای نسبت هم‌ارزی 0.6 متان-هوا در مقطع میانی محفظه

بوده و این نشان‌دهنده یکنواختی توزیع دما می‌باشد. با دور شدن از ناحیه واکنش، دما به تدریج کاهش می‌یابد و در نزدیکی دیواره دما در محدوده 330 K قرار می‌گیرد. این قسمت به وسیله گازهای نسوخته با چگالی زیاد و دمای کم پوشش داده شده است. به این ترتیب از اتلاف حرارت به وسیله دیواره جلوگیری می‌شود. "شکل 7" برای مقطع میانی محفظه احتراق آورده شده است.

#### 4-4- پایداری شعله لوله‌ای در احتراق متان-هوا

برای تعیین نواحی مختلف تشکیل و پایداری شعله لوله‌ای نمودار نسبت هم-ارزی ( $\phi$ )، برحسب کسر مولی اکسیژن ( $\beta$ ) موجود در اکسیدکننده رسم می‌شود. برای این کار سرعت ورودی اکسیدکننده ثابت در نظر گرفته می‌شود و در یک کسر مولی مشخص برای اکسیژن، با تغییر سرعت ورودی سوخت نسبت‌های هم‌ارزی مختلف به دست می‌آید. در هر حالت تشکیل و عدم تشکیل شعله لوله‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در ابتدا از هوا به‌عنوان اکسیدکننده استفاده شد و امکان تشکیل شعله لوله‌ای و پایداری آن در مقادیر مختلف نسبت هم‌ارزی مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده اگر از هوا که کسر مولی اکسیژن در آن 0.21 است، به‌عنوان اکسیدکننده استفاده شود، شعله لوله‌ای در صورتی پایدار است که نسبت هم‌ارزی بیشتر از 0.5 باشد. به ازای نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از 0.5، در ناحیه خاموشی<sup>1</sup> قرار گرفته و شعله‌ای تشکیل نمی‌شود. معیار خاموشی شعله در این پژوهش، کاهش دمای ناحیه واکنش به مقادیر کمتر از 600 K بعد از اتمام جرقه در محفظه احتراق می‌باشد.

حال اگر مقداری اکسیژن به هوا اضافه شود، کسر مولی اکسیژن افزایش یافته و به این ترتیب می‌توان نواحی مختلف تشکیل شعله را مورد بررسی قرار داد. برای کسر مولی اکسیژن برابر با 0.4 و به‌ازای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف، امکان تشکیل شعله لوله‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشاهده می‌شود که به ازای نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از 0.25، در ناحیه خاموشی قرار گرفته و شعله تشکیل نمی‌شود. با افزایش نسبت هم‌ارزی، شعله لوله‌ای به ازای مقادیر بین 0.25 و 0.95 به صورت پایدار تشکیل می‌شود. با افزایش نسبت هم‌ارزی

0.03 است. همچنین در این حالت، تغییرات گونه مونوکسیدکربن از شعاع 4 mm تا 7 mm می‌باشد در حالی که در مطالعه تجربی این تغییرات از شعاع 2 mm تا 6 mm است. با استفاده از سینتیک DRM22 مقدار بیشینه گونه مونوکسیدکربن برابر با مقدار تجربی پیش‌بینی شده است؛ اما در این حالت هم مشاهده می‌شود که تغییرات گونه مونوکسیدکربن از شعاع 4 تا 6 mm رخ می‌دهد. با توجه به نمودار توزیع گونه مونوکسیدکربن مشخص است که در  $r=6$  mm مقدار خطا بسیار ناچیز (نزدیک صفر) بوده در حالی که در محدوده  $r=2$  mm تا  $r=4$  mm مقدار خطا از 50 درصد تا 75 درصد متغیر می‌باشد. علت این پدیده ممکن است ناشی از خواص جریان باشد. در پژوهش حاضر، عدد اشمیت آشفته مقدار ثابت 1 در نظر گرفته شده است. همچنین برای گونه‌های مختلف، عدد اشمیت یکسان و برابر با 1 در نظر گرفته شده که می‌تواند منجر به این خطا گردد. عدد اشمیت گونه مونوکسیدکربن در دمای 300 K برابر با 0.84 می‌باشد در حالیکه در کار حاضر این مقدار برای تمامی گونه‌ها برابر با 1 در نظر گرفته شده است. بنابراین مقدار نفوذ مولکولی (D) در حالتی که مقدار عدد اشمیت 1 باشد نسبت به حالتی که مقدار آن 0.84 باشد، کوچکتر خواهد بود؛ زیرا مقدار ویسکوزیته دینامیکی فقط تابعی از دما می‌باشد. در این حالت مقدار شار نفوذ مولکولی این گونه کمتر بوده و نمودار به شکل نشان داده شده، در می‌آید. لازم به ذکر است که سینتیک یک مرحله‌ای توانایی پیش‌بینی غلظت گونه مونوکسیدکربن را ندارد.

با توجه به "شکل 6" مشخص است با ورود به ناحیه واکنش، مونوکسیدکربن تولید شده و به مقدار بیشینه خود رسیده است و سپس با نزدیک شدن به محصولات احتراق در مرکز محفظه و خروج از ناحیه واکنش، مقدار این گونه نیز کاهش یافته است. دلیل این امر این است که مونوکسیدکربن جزء گونه‌های میانی بوده و در ناحیه واکنش تولید و سپس مصرف می‌شود.

#### 4-3- بررسی توزیع دما

در "شکل 7" کانتور دما برای شعله لوله‌ای در نسبت هم‌ارزی 0.6 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای شعله و ناحیه داخل آن، هم‌دما

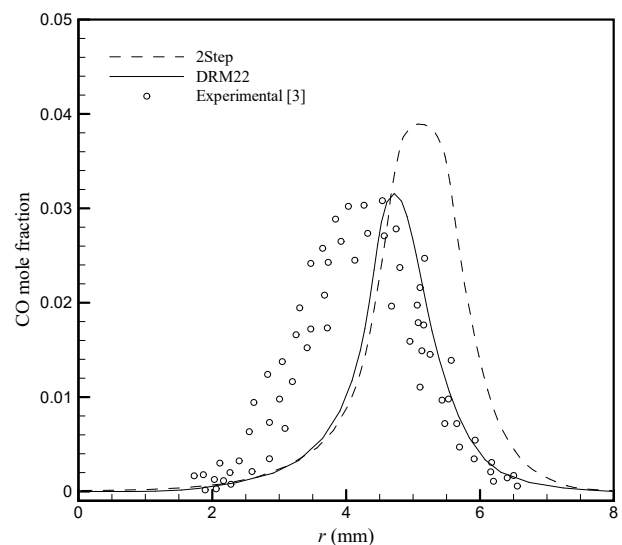


Fig. 6 Radial distribution of CO mole fraction using  $\text{CH}_4/\text{air}$  in the middle of combustion chamber

شکل 6 توزیع شعاعی غلظت گونه مونوکسیدکربن در حالت استفاده از متان-هوا در مقطع میانی محفظه احتراق

<sup>1</sup> Extinction

با افزایش عدد لوییس، نفوذ حرارتی واکنش‌دهنده‌ها افزایش می‌یابد؛ اما به نظر می‌رسد واکنش‌دهنده‌ها از نفوذ جرمی با سرعت کافی برای جلوگیری از نوسانات دما که به دلیل افزایش نفوذ حرارتی ایجاد شده است، ناتوان می‌باشند [19]. به این ترتیب شعله ناپایدار می‌شود. طبق مطالعات تجربی [21]، این ناپایداری در نسبت‌های هم‌ارزی بزرگ رخ می‌دهد. در این شرایط شعله در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک به حد خاموشی پایدار می‌شود.

در کسر مولی اکسیژن برابر با 1 که از اکسیژن خالص به‌عنوان اکسیدکننده استفاده شده است، به ازای نسبت‌های هم‌ارزی در محدوده 0.1 تا 0.2 شعله لوله‌ای پایداری تشکیل می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد با وجود مزایایی که احتراق در حضور اکسیژن خالص به‌عنوان اکسیدکننده نسبت به هوا دارد، اما ناحیه پایداری شعله به شدت کاهش یافته و در محدوده باریک‌تری شعله لوله‌ای پایدار و یکنواخت تشکیل می‌شود. دلیل این امر همان‌گونه که اشاره شد، افزایش عدد لوییس اکسیدکننده و ناتوانی واکنش‌دهنده‌ها برای جلوگیری از نوسانات دمایی می‌باشد. با افزایش نفوذ حرارتی، نوسانات دمایی شعله افزایش یافته و شعله ناپایدار می‌شود. در نسبت‌های هم‌ارزی کمتر و نزدیک به حد خاموشی، نوسانات دمایی کاهش یافته و شعله در محدوده پایداری قرار می‌گیرد.

با مقایسه نتایج موجود با نتایج تجربی مشخص است که در حد پایینی پایداری شعله لوله‌ای تطابق قابل قبولی بین نتایج برقرار است اما در حد بالا مقداری خطا وجود دارد و محدوده پایداری شعله بیشتر از حالت واقعی پیش‌بینی شده است. مقدار خطای متوسط بین نتایج عددی و داده‌های تجربی، 12.5 درصد می‌باشد.

#### 5-4- پایداری شعله لوله‌ای در احتراق متان-اکسیژن و در حضور دی‌اکسیدکربن به‌عنوان رقیق‌کننده

در قسمت قبل پایداری شعله لوله‌ای زمانی که از هوا به‌عنوان اکسیدکننده استفاده شود، مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت به جای نیتروژن موجود در هوا از دی‌اکسیدکربن استفاده می‌شود. برای انجام این شبیه‌سازی از سینتیک GRI-Mech 3.0 استفاده شده است. عملکرد در این قسمت کاملاً شبیه حالت قبل است و پایداری شعله در حضور دی‌اکسیدکربن و به ازای مقادیر مختلف کسر مولی اکسیژن، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به این ترتیب در مرحله اول از 79 درصد دی‌اکسیدکربن و 21 درصد اکسیژن به‌عنوان اکسیدکننده استفاده می‌شود. شعله لوله‌ای در این حالت تا زمانی پایداری است که نسبت هم‌ارزی مخلوط واکنش‌دهنده بیشتر از 0.65 باشد. به عبارتی اگر نسبت هم‌ارزی کمتر از 0.65 باشد، در ناحیه خاموشی قرار گرفته و شعله لوله‌ای تشکیل نمی‌شود.

برای تعیین نواحی پایداری شعله لوله‌ای، با افزایش مقدار اکسیژن در اکسیدکننده و در نتیجه کاهش دی‌اکسیدکربن، روند بالا تکرار می‌شود. طبق نتایج به‌دست آمده، در کسر مولی اکسیژن برابر با 0.4، شعله لوله‌ای به ازای نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر از 0.35 به صورت پایدار تشکیل می‌شود. با افزایش نسبت هم‌ارزی شعله لوله‌ای پایدار و یکنواخت باقی می‌ماند.

در کسر مولی اکسیژن 0.6 شعله لوله‌ای پایدار در محدوده نسبت هم‌ارزی 0.3 تا 0.75 تشکیل می‌شود. با افزایش نسبت هم‌ارزی به مقادیر بیشتر از 0.75، به محدوده احتراق ناپایدار وارد شده و مدل‌های موجود پاسخ مناسبی برای این قسمت ارائه نمی‌دهد. در "شکل 9" نواحی مختلف شعله لوله‌ای در حضور دی‌اکسیدکربن آورده شده است. با مقایسه نتایج موجود با نتایج تجربی مشخص است که در حد پایینی پایداری شعله لوله‌ای تطابق

شعله لوله‌ای از حالت یکنواختی و پایداری خارج شده و به صورت ناپایدار تشکیل می‌شود [6] که بررسی ناپایداری در این پژوهش مورد نظر نبوده است. به این ترتیب به ازای مقادیر مختلف کسر مولی اکسیژن، می‌توان امکان تشکیل شعله لوله‌ای را در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف تعیین کرد.

نواحی مختلف شعله لوله‌ای در نمودار "شکل 8" آورده شده است طبق نمودار مشخص است که با افزایش کسر مولی اکسیژن، حد پایینی و بالایی مقدار نسبت هم‌ارزی که در آن شعله لوله‌ای پایدار تشکیل می‌شود، کاهش یافته و ناحیه‌ای که در آن شعله لوله‌ای پایدار تشکیل می‌شود باریک می‌شود و تنها در نسبت‌های هم‌ارزی کم و مخلوط رقیق، شعله لوله‌ای پایدار تشکیل می‌شود. دلیل این امر را می‌توان با کمک دو عدد لوییس (Le) و دامکلا (Da) به‌صورت فیزیکی توجیه کرد. ساختار شعله غیر پیش‌آمیخته به عدد دامکلا وابسته می‌باشد [6]. این عدد به صورت نسبت زمان اختلاط به زمان انجام واکنش شیمیایی تعریف می‌شود. اگر  $Da \gg 1$  باشد، شعله در هر شرایط به صورت پایدار تشکیل می‌شود [19]. اگر  $Da \leq Da_{ext}$  باشد، خاموشی شعله رخ خواهد داد.  $Da_{ext}$  عدد دامکلا بحرانی بوده که بیشترین مقدار عدد دامکلا است که به ازای آن شعله در محدوده خاموشی قرار می‌گیرد. در این پژوهش مدل احتراقی واکنشگاه نیمه مخلوط بکار رفته است. مدل واکنشگاه نیمه مخلوط عدد دامکلا را محدود و در مرتبه واحد فرض می‌کند [20]. به عبارتی زمان اختلاط و انجام واکنش شیمیایی را هم مرتبه در نظر می‌گیرد. در این صورت عدد دامکلا هم از مرتبه عدد دامکلا خاموشی بیشتر بوده و شعله تشکیل می‌شود و هم در مرتبه بی‌نهایت نیست که از ایجاد ناپایداری جلوگیری کند [19]. در این صورت احتمال رخ دادن ناپایداری وجود دارد. حال نقش عدد لوییس مهم می‌شود. با توجه به اینکه احتراق به‌صورت غیر پیش‌آمیخته است، دو عدد لوییس، یکی برای سوخت و یکی برای اکسیدکننده، تعریف می‌شود. اگر عدد لوییس هر یک از دو طرف، غیر واحد باشد، احتمال وقوع ناپایداری بسیار افزایش خواهد یافت [19]. در محدوده  $Da_{ext} < Da < \infty$ ، با افزایش عدد لوییس اکسیدکننده، ناحیه پایداری شعله کاهش یافته و شعله فقط در نسبت‌های هم‌ارزی کم، به صورت پایدار باقی می‌ماند [19]. در پژوهش حاضر، با افزایش کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده، عدد لوییس در سمت اکسیدکننده افزایش یافته و محدوده پایداری شعله به نسبت‌های هم‌ارزی کوچک‌تر محدود می‌شود. در این حالت

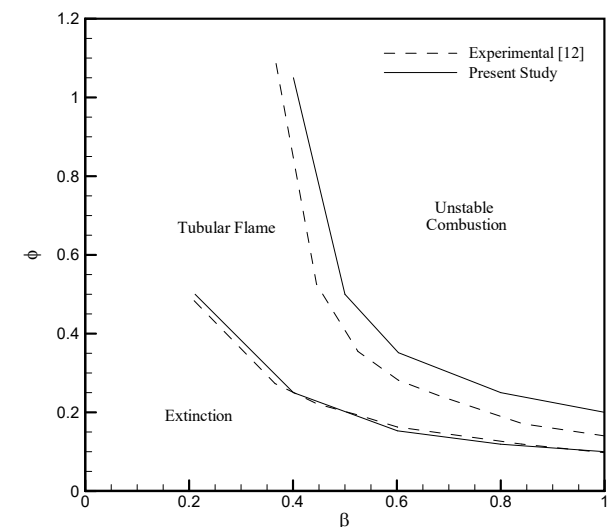


Fig. 8 Mappings of various combustion regions for tubular flame

شکل 8 نواحی مختلف احتراق در شعله لوله‌ای

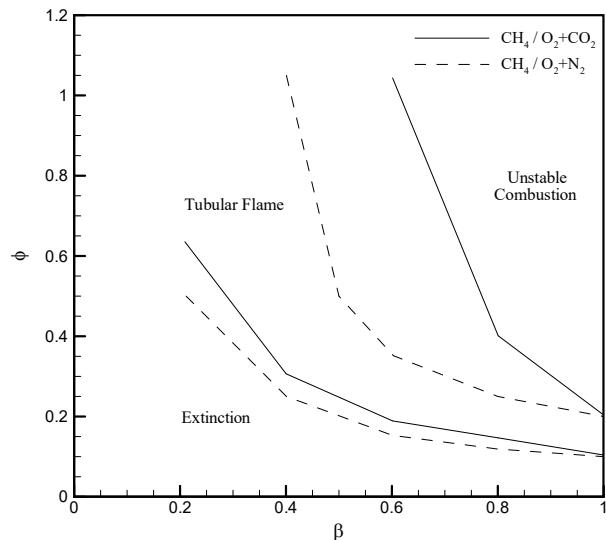


Fig. 10 Comparison of Mappings of various combustion regions for tubular flame for the oxidizers of  $O_2/CO_2$  and  $O_2/N_2$

شکل 10 مقایسه نواحی مختلف احتراق در شعله لوله‌ای برای دو اکسیدکننده  $N_2/O_2$  و  $CO_2/O_2$

### 5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، شعله لوله‌ای در میدان جریان چرخشی به صورت عددی شبیه‌سازی شد. در مدل ارائه شده فرایندهای احتراق غیر پیش‌آمیخته، مدل اغتشاشی و تشعشی لحاظ شده است. هدف اصلی از این شبیه‌سازی، تعیین ساختار و محدوده پایداری شعله لوله‌ای و بررسی عوامل تأثیرگذار بر پایداری شعله می‌باشد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که توزیع دمای شعله لوله‌ای یکنواخت بوده و نقاط داغ در طول محفظه تشکیل نمی‌شود. همچنین دمای مخلوط در نزدیکی دیواره محفظه احتراق بسیار پایین بوده و در نتیجه اتلاف حرارت از این طریق انجام نمی‌شود. زمانی که از هوا به‌عنوان اکسیدکننده استفاده می‌شود، شعله لوله‌ای در صورتی پایدار است که نسبت هم‌ارزی بیشتر از 0.5 باشد. با افزایش کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده، ناحیه پایداری شعله کوچک‌تر شده و شعله در نسبت‌های هم‌ارزی کوچک‌تری پایدار می‌شود. اگر از اکسیژن خالص به‌عنوان اکسیدکننده استفاده شود، شعله لوله‌ای به ازای نسبت‌های هم‌ارزی بین 0.1 تا 0.2 پایدار می‌شود. با اضافه کردن دی‌اکسیدکربن به اکسیژن، ناحیه پایداری شعله تعیین و مشخص شد که محدوده پایداری شعله در این حالت نسبت به حالت قبل بیشتر بوده و شعله در محدوده وسیع‌تری از نسبت هم‌ارزی به صورت یکنواخت و پایدار تشکیل می‌شود.

### 6- فهرست علائم

$d$	قطر محفظه احتراق (mm)
$D$	ضریب نفوذ جرمی ( $m^2s^{-1}$ )
$Da$	عدد دامکلا
$h_s$	انتالپی محسوس ( $Jkg^{-1}$ )
$k$	انرژی جنبشی اغتشاشی ( $Jkg^{-1}$ )
$l$	طول محفظه احتراق (mm)
$L$	طول مشخصه (mm)
$Le$	عدد لوئیس

قابل قبولی بین نتایج برقرار است اما در حد بالا مقداری خطا وجود دارد و محدوده پایداری شعله بیشتر از حالت واقعی پیش‌بینی شده است. متوسط خطا بین نتایج عددی و تجربی 19 درصد می‌باشد.

با افزایش کسر مولی اکسیژن و کاهش دی‌اکسیدکربن، محدوده پایداری شعله لوله‌ای کاهش می‌یابد. رفتار نمودار به‌دست آمده در این حالت کاملاً شبیه به زمانی است که از نیتروژن به‌عنوان رقیق‌کننده استفاده شده است. در این حالت نیز با افزایش کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده، عدد لوئیس اکسیدکننده افزایش یافته و به دلیل نوسانات دمایی شعله ناپایدار می‌شود. با کاهش نسبت هم‌ارزی، شعله در محدوده پایدار قرار می‌گیرد.

در "شکل 10" نمودار ناحیه پایداری شعله در هر دو حالت آورده شده با یکدیگر مقایسه شده است. استفاده از دی‌اکسیدکربن باعث می‌شود حد پایینی پایداری شعله لوله‌ای بالاتر از حد پایینی زمانی که از نیتروژن استفاده می‌شود، قرار گیرد. به‌عبارتی این شعله در حضور دی‌اکسیدکربن در نسبت‌های هم‌ارزی بزرگ‌تری به صورت پایداری در می‌آید. دلیل این امر این است که دی‌اکسیدکربن نسبت به نیتروژن نفوذ حرارتی کمتر دارد. در نتیجه عدد لوئیس دی‌اکسیدکربن کمتر از عدد لوئیس نیتروژن می‌باشد [6]. به این ترتیب و با توجه به استدلال‌های ذکر شده در حد بالایی پایداری شعله لوله‌ای هم‌اتفاقی مشابه رخ می‌دهد و شعله در حضور دی‌اکسیدکربن در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتری به ناحیه احتراق ناپایدار وارد می‌شود.

به این ترتیب به نظر می‌رسد محدوده پایداری شعله لوله‌ای در حضور دی‌اکسیدکربن به‌عنوان رقیق‌کننده، بزرگ‌تر است. دلیل این امر پایین‌تر بودن نفوذ حرارتی دی‌اکسیدکربن نسبت به نیتروژن می‌باشد. بنابراین زمانی که از اکسیژن در حضور دی‌اکسیدکربن به‌عنوان اکسیدکننده استفاده می‌شود، عدد لوئیس اکسیدکننده کمتر از زمانی است که از هوا به‌عنوان اکسیدکننده استفاده می‌شود. به این ترتیب با استفاده از  $CH_4/O_2+CO_2$ ، نوسانات دمایی در نسبت‌های هم‌ارزی بزرگ‌تری شروع شده و محدوده پایداری شعله نسبت به حالت  $CH_4/O_2+N_2$  افزایش می‌یابد. البته با افزایش کسر مولی اکسیژن و برای مقادیر بیشتر از 0.95، با کاهش کسر مولی دی‌اکسیدکربن و نیتروژن در اکسیدکننده، محدوده پایداری شعله لوله‌ای در هر دو حالت بسیار به یکدیگر نزدیک می‌شود.

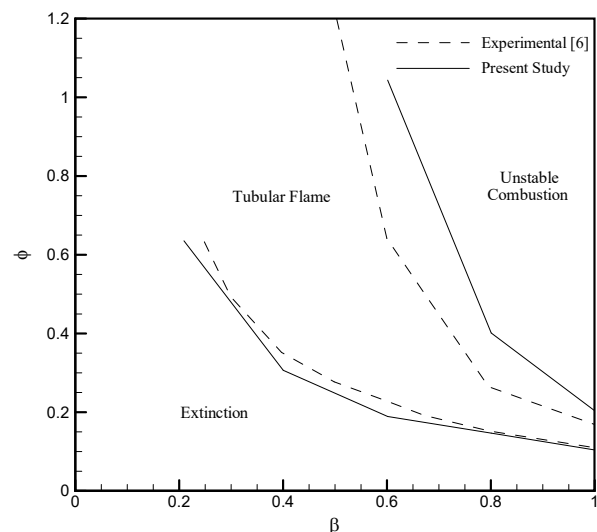


Fig. 9 Mappings of various combustion regions for tubular flame in presence of  $CO_2$

شکل 9 نواحی مختلف احتراق در شعله لوله‌ای در حضور دی‌اکسیدکربن



7- مراجع

[1] S. Ishizuka, Characteristics of Tubular Flames, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 19, No. 3, pp. 187-226, 1993.

[2] S. Ishizuka, T. Takeno, A Tubular Flame Theory, *Combustion and Flame*, Vol. 64, No. 1, pp. 83-98, 1986.

[3] S. Ishizuka, R. Pitz, D. Dunn-Rankin, T. Takeno, *Tubular Combustion*, First edition, pp. 37-50, U.S.A: Momentum Press, 2013.

[4] S. Hu, P. Wang, R. Pitz, M. Smooke, Experimental and numerical investigation of non-premixed tubular flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 2, pp. 1093-1099, 2007.

[5] D. Shimokuri, S. Ishizuka, Flame stabilization with a tubular flame, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, No. 1, pp. 399-406, 2005.

[6] B. Shi, J. Hu, S. Ishizuka, Carbon dioxide diluted methane/oxygen combustion in a rapidly mixed tubular flame burner, *Combustion and Flame*, Vol. 162, No. 2, pp. 420-430, 2014.

[7] B. Shi, D. Shimokuri, S. Ishizuka, Reexamination on methane/oxygen combustion in a rapidly mixed type tubular flame burner, *Combustion and Flame*, Vol. 161, No. 5, pp. 1310-1325, 2014.

[8] J. Bibrzycki, T. Poinso, Reduced chemical kinetic mechanisms for methane combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere, *Working note ECCOMET WN/CFD/10/17*, CERFACS, 2010.

[9] R. Pitz, D. Mosbacher, J. Wehrmeyer, C. J. Sung, Experimental And Numerical Investigation of Premixed Tubular Flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 2, pp. 1479-1486, 2002.

[10] S. Hu, R. Pitz, Structural study of non-premixed tubular hydrocarbon flames, *Combustion and Flame*, Vol. 156, No. 1, pp. 51-61, 2009.

[11] S. Shopoff, P. Wang, R. Pitz, The effect of stretch on cellular formation in non-premixed opposed-flow tubular flames, *Combustion and Flame*, Vol. 158, No. 5, pp. 876-884, 2011.

[12] B. Shi, D. Shimokuri, S. Ishizuka, Methane/oxygen combustion in a rapidly mixed type tubular flame burner, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34, No. 2, pp. 3369-3377, 2013.

[13] Y. Shiraga, T. Hori, A. Kegasa, F. Akamatsu, Development of a Low NOX Two-Stage Tubular Flame Burner with Intercooling under Near Stoichiometric Conditions, *Fuel*, Vol. 72, No. 1, pp. 237-242, 2015.

[14] T. Poinso, D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, Second edition, pp. 478-510, Philadelphia, U.S.A: Edwards, 2005.

[15] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics*, Second edition, pp. 230-250, London: Pearson, 2007.

[16] P. N. Nordin, *Complex chemistry modeling of diesel spray combustion*, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2001.

[17] OpenFOAM, *The Open Source CFD Toolbox User Guide*, pp. 177-183, 2016.

[18] S. S. Sazhin, E. M. Sazhina, The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations, *Fuel*, Vol. 75, No. 3, pp. 289-294, 1996.

[19] M. Matalon, The onset of oscillations in non-premixed combustion, *Combustion and Flame*, Vol. 67, No. 3, pp. 104-108, 2001.

[20] J. A. Karlsson, *Modelling Auto-Ignition: Flame Propagation and Combustion in Non-stationary Turbulent Spray*, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1995.

[21] M. Matalon, Flame oscillations in non-premixed systems-diffusion flames and edge flames, *Combustion and Flame*, Vol. 39, No. 4, pp. 163-191, 2003.

$P$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$\bar{q}$	نرخ متوسط گرمای حاصل از احتراق ( $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-3}$ )
Re	عدد رینولدز
$R_{\mu}$	بخش ثابت جمله چشمه تشعشع ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
$R_p$	تابعی در جمله چشمه تشعشع ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-4}$ )
$s$	عرض ورودی نازل (mm)
$Sh$	نرخ انتقال حرارت تابشی ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
$STh$	جمله چشمه جرقه
$T$	دما (K)
$u_j$	سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )
$V$	سرعت مشخصه ( $\text{ms}^{-1}$ )
$w$	ارتفاع ورودی نازل (mm)
$Y$	کسر جرمی گونه‌ها
<b>علائم یونانی</b>	
$\alpha$	ضریب نفوذ حرارتی مولکولی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )
$\beta$	کسر مولی اکسیژن
$\delta$	تابع دلتای کروئکر
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\omega$	فرکانس اضمحلال انرژی جنبشی اغتشاشی ( $\text{s}^{-1}$ )
$\bar{\omega}_k$	نرخ متوسط گونه $k$ ام ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\emptyset$	نسبت هم‌ارزی
<b>زیرنویس‌ها</b>	
$k$	مربوط به گونه $k$ ام
$i$	راستای $i$
$j$	راستای $j$
Eff	مؤثر