ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

مطالعه عددی ساختار و پایداری احتراق متان-هوا و متان- اکسیژن در یک شعله لولهای غير ييش آميخته و مغشوش

مهدی بر دیار ¹، هادی پاسیدار شبهر ی^{2*}

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

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

ېمعناهاسان مېرمې مېر چکيده	* مهران، صدوق پستی ۲۱۱-۱۹۱۶، ۱۱۱. اطلاعات مقاله
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 بهصورت عددی شبیهسازی شده است. برای شبیهسازی عددی حلگری در نرمافزار متن باز اینفوم توسعه داده شده و	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 14 مهر 1395 پذیرش: 11 آذر 1395 ارائه در سایت: 05 دی 1395
تنایج 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 پایدار تشکیل میشود. اگر از اکسیژن خالص به عنوان اکسیدکننده استفاده شود، شعله در نسبتهای همارزی بین 0.1 تا 2.0 پایدار میشود و دمای	کر مسلم <i>واژگان:</i> احتراق شعله غیر پیش آمیخته پایداری
سعنه بسیار افزایش مییابد. برای کنترل دهای شعبه دی کشید کرین از محضوء ت خروجی به اکشید کنده اصفه میشود. در ادامه افزات اصفه کردن دی[کسیدکرین 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 Pasdarshahri⁷

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

ARTICLE INFORMATION

ABSTRACT

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

Keywords: Tubular Flame Combustion Non-premixed Flame Stability

Please cite this article using:

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 می شود؛ اما در

شعلههای لولهای ٰ به شعلهای اطلاق می شود که سطح مقطع آن دایرهای بوده و در واقع بهصورت یک استوانه توخالی شکل می گیرد. در این شعلهها شعاع

```
<sup>1</sup> Tubular Flame
```

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

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 تقریبا یکسان بوده و انتقال حرارت به صورت یکنواخت انجام میشود. با این مزیت بزرگ در شعله لولهای نوسانات حرارتی و نقاط داغ^۱ 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 بهطور کلی به دو دسته تقسیم میشوند. دسته اول شعلههای لولهای در میدان جریان واکنشی چرخشی و دسته دوم شعلههای لولهای در میدان جریان واکنشی غیرچرخشی است. در دسته اول سوخت و اکسیدکننده بهطور 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 بهصورت 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 پیش گرم کردن هوا با عبور لوله حاوی جریان هوا از وسط شعله لولهای [3]، گرمایش یکنواخت در سر موتور استرلینگ [3]، استفاده از شعله لولهای بهعنوان پیلوت 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. بهعنوان 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 بهعنوان 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 این که احتراق اکسیژن- سوخت منجر به بالا رفتن بیش از حد دما شده، معمولا ترکیبی از اکسیژن و گونهای از محصولات خروجی به عنوان اکسیدکننده مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین دیاکسیدکربن ذخیره شده به اکسیژن در اکسیدکننده اضافه می شود. دلیل اصلی اضافه کردن دیاکسید کربن به اکسیژن، کاهش دمای احتراق می باشد [8].

پیتز و همکارانش به مطالعه تجربی و عددی شعله لولهای پیش آمیخته آرام در میدان جریان غیرچرخشی پرداختند. در مطالعه تجربی از روش پراکندگی رامان و در مطالعه عددی از کد توسعه یافته آپدیف استفاده شده است. در این مطالعه، توزیع دما و غلظت گونههای مهم احتراق بهدست آمد و مطابقت قابل قبولی بین نتایج عددی و دادههای تجربی وجود داشت [9]. ایشان همچنین به مطالعه تجربی شعله لولهای غیر پیش آمیخته آرام در میدان جریان غیرچرخشی نیز پرداختند و برای بررسی تأثیر انحنا بر ساختار شعله، توزیع دمای آن را با توزیع دمای یک شعله مسطح خلاف جهت مقایسه کردند. طبق نتایج بهدست آمده در شرایطی که عدد لوییس سوخت کمتر از یک باشد، انحنای به شدت بر دمای شعله اثر گذاشته و دمای شعله نسبت به شعله مسطح خلاف جهت در حدود K 08 کمتر است. در حالتی که عدد

لوييس سوخت برابر يا بيشتر از يک باشد، اثر انحنا بر دما كاهش مىيابد [10]. شوپوف و همکارانش به بررسی تجربی ناپایداری سلولی در شعله لولهای غیر پیش آمیخته پرداختند. ایشان مشاهده کردند که با افزایش سرعت ورودی سوخت، شعله لولهای ابتدا گسسته شده و کاملا ساختار سلولی پیدا کرده و با ادامه افزایش سرعت، سلولها کوچکتر شده و شعله در انتها خاموش می شود [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 رقیق کننده دی کسید کربن 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 دی کسید کربن، شعله لوله ای در محدوده بزرگتری از نسبت هم ارزی به صورت پایدار تشکیل می شود [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 میباشند. نحوه عملكرد اين محفظه احتراق به اين صورت است كه 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 بهدست 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 پیش آمیخته در میدان جریان چرخشی به صورت عددی شبیه سازی 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 دی اکسیدکربن به عنوان رقیق کننده استفاده شده است. در این بررسی، علاوه بر فرایند احتراق، انتقال حرارت تشعشی درون محفظه این بررسی، علاوه بر فرایند احتراق، انتقال حرارت تشعشی درون محفظه احتراق، لحاظ شده است. همچنین از سینتیکهای یک مرحلهای، دو مرحله ی و SMM2 برای شبیه سازی 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 می دهند. در این پژوهش ساختار و محدوده پایداری شعله لولهای در میدان جریان مغشوش، برای اولین بار به صورت عددی شبیه سازی شده است.

2- معادلات حاكم

1 Hot Spot

معادلات حاکم برای شبیه سازی شعله لوله ای غیر پیش آمیخته شامل بقای جرم، بقای مومنتم، بقای انرژی و بقای گونه ها می باشد. برای محاسبات

563

² Swirl burner

جریان با چگالی متغیر از روش متوسط گیری جرمی استفاده شده است. معادلات حاكم طي روابط (1) تا (4) آمده است.

🖌 معادله بقای جرم

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

معادله انتقال مومنتم

$$\frac{\partial (\bar{\rho}\tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu_{\rm eff}(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i})) - \frac{2}{3} \mu_{\rm eff} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij})$$
(2)

$$\frac{\partial \left(\bar{\rho}\tilde{h}_{s}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\bar{\rho}\tilde{u}_{i}\tilde{h}_{s}\right)}{\partial x_{i}} = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\alpha_{\text{eff}}\frac{\partial\tilde{h}_{s}}{\partial x_{i}}\right) + \bar{q}$$
$$+Sh + STh \qquad (3)$$

$$\ll$$
 معادله بقای جرم گونه λ ام
 $\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{V}_k) = \partial\left(-\frac{1}{2}m \partial\tilde{Y}_k\right) = -\frac{1}{2}$

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

در روابط بالا، \bar{p} چگالی، \tilde{u} بردار سرعت، \bar{p} فشار، $\mu_{
m eff}$ لزجت دینامیکی مؤثر، $ar{h}_s$ انتالپی محسوس، $lpha_{
m eff}$ ضریب نفوذ حرارتی مؤثر، $ar{ar{q}}$ نرخ متوسط $ar{h}_s$ گرمای حاصل از احتراق، $ilde{Y}_k$ کسر جرمی گونه kم، $D^m_{ ext{eff},k}$ ضریب نفوذ جرمی $\overline{\dot{\omega}}_k$ مؤثر گونه kام، Sh جمله چشمه تشعشع، STh جمله چشمه جرقه و نرخ متوسط واكنش گونه klم است.

1-2- مدل اغتشاشي

برای شبیهسازی اغتشاش جریان از مدل دو معادلهای کی-امگا اس استی استفاده شده است. در این مدل برای هر یک از متغیرهای انرژی جنبشی اغتشاشی k و فرکانس ω یک معادله انتقال حل می شود و لزجت اغتشاشی را به وسیله آن دو متغیر، طبق مدل بوزینسک تخمین میزند [14]. این مدل تركيبي از دو مدل كي-اپسيلون و كي-امگا بوده و به اين صورت است كه در نزدیکی دیواره از مدل کی⊣مگا و در ناحیه خارج از لایه مرزی از مدل کی-اپسیلون 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 متوسط گیری شده، به کار می ود و روابطی را برای تعیین شار گونههای شیمیایی تعیین میکند [14]. در شبيهسازى احتراق غير پيشآميخته مىتوان از مفهوم اتلاف گردابه و واکنشگاه نیمه مخلوط اً 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 می شود. در این مدل، اندازه قسمت واکنشی در مرتبه زیر شبکهها بوده و به صورت یک واکنشگاه اختلاط ایدهآل در نظر گرفته می شود. در قسمت واکنشی، واکنش به صورت کامل انجام شده و غلظت متوسط در هر سلول در اثر تبادل جرم بين ناحيه واكنشى و غير واكنشى تغيير مىكند [16].

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 بهصورت معادله (5) انجام مے شود.

$$Sh() = R_u() - R_p()T^4$$

در معادله (5)،T دما و R_p و R_p توابعی هستند که با توجه به مدل تشعشعی مورد استفاده در حلگر تعریف می شوند. 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 CO_2 و H_2O در محصولات احتراق، از مدل گاز خاکستری برای شبیه سازی رفتار تشعشی گازهای موجود استفاده شده است.

4-2- هندسه مورد بررسی

(5)

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 K 298 و فشار 101325 Pa است. اکسیدکننده با دبی حجمی ثابت $10 \text{ m}^3/\text{h}$ بهصورت مماسی به محفظه احتراق وارد می شوند. در مرحله اول از هوا به عنوان اکسیدکننده استفاده شده و با تغییر کسر مولی اکسیژن، ناحیه پایداری شعله لولهای تعیین می شود. 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 تشكيل شعله لولهاي پايدار مورد بررسي قرار مي گيرد.

در مرحله دوم از اکسیژن خالص بهعنوان اکسیدکننده همراه با دیاکسیدکربن به عنوان رقیق کننده استفاده می شود. در این مرحله نیز روش کار دقیقا مانند مرحله قبل بوده و در هر کسر مولی، امکان تشکیل شعله لولهای پایدار در نسبتهای همارزی مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. 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

شكل 1 محفظه احتراق شعله لولهاى

¹ Eddy dissipation concept (EDC) ² Partially stirred reactor (PaSR)

T 11 1 C

محفظه احتراق	1 ابعاد	جدول
--------------	---------	------

Table I Size of Burner	
اندازه (mm)	پارامتر
100	طول محفظه (l)
16	قطر محفظه احتراق (d)
2	عرض شیار ورودی (s)
8	ار تفاع شیار ورودی (w)

جدول 2 شرايط عملكردى

Table 2	Operating Conditi	ons	
	β	Ø	$V_f (m/s)$
	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" به صورت شبکه با سازمان^۱ تقسیم و شبکهبندی شده است. برای افزایش دقت نتایج، شبکهبندی در ناحیههایی که تغییرات زیاد است، ریزتر می باشد.

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، شبیه سازی عددی شعله لوله ای به صورت سه بعدی و با استفاده از حلگر توسعه یافته در نرمافزار متن باز این فوم صورت پذیرفته است.

این حلگر که بر مبنای حلگر روریکتینگفوم^۲ بوده، قابلیت شبیهسازی



Fig. 2 Grid of computational field

شکل 2 شبکهبندی میدان محاسباتی

احتراق غير ييش آميخته آشفته با استفاده از مدل احتراقي واكنشگاه نيمه مخلوط و بدون در نظر گرفتن تشعشع را دارا است. در این کد از روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات حاکم استفاده شده است. گسسته سازی 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^۳ برای تصحیح فشار استفاده شده است. این الگوریتم ترکیبی از دو الگوریتم سیمپل ًو پیزو ً مىباشد. در دو الگوريتم سيمپل و پيزو، ابتدا ميدان حل اوليه پيشبينى شده و سپس تصحيح مي شود. با اين تفاوت كه در الگوريتم سيمپل عمليات تصحیح فقط یک بار انجام می شود و در مسائل پایا به کار می رود در حالی که در الگوریتم پیزو، عملیات تصحیح دو بار انجام می شود و برای حل جریان های گذرا استفاده شده و به همین دلیل از عملیات زیر تخفیف ٔ استفاده نمی کند. 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 می توان 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 $1^{-6} \times 1$ در نظر گرفته شده است.

4- نتايج و بحث

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

1-4- استقلال از شبکه

برای حل مسأله ابتدا عدم وابستگی حل عددی به شبکه محاسباتی بررسی شد. 4 شبکه با تعداد سلول 120000، 360000، 20000 و 120000 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. همان طور که از نمودار پیداست، نتایج دو شبکه 20000 و 1200000 تفاوت بسیار کمی با یکدیگر دارند و تقریبا روی یکدیگر قرار گرفتهاند. بنابراین شبکه با تعداد 20000 سلول برای حل عددی انتخاب شده است.

565

¹ Structure grid

² rhoReactingFoam

³ PIMPLE ⁴ SIMPLE

⁵ PISO

⁶ under relaxation

DRM22 و مرحلهای یک مرحلهای، دو مرحلهای و DRM22 پس از انجام عدم وابستگی حل عددی به شبکه و یافتن شبکه مناسب، نتایج حل عددی با شبکه و یافتن شبکه مناسب، نتایج DRM22 پس از انجام عدم وابستگی حل عددی به شبکه و یافتن شبکه مناسب، نتایج DRM22 محاده ای دو مرحلهای و DRM22 با دادههای تجربی مقایسه شده است. زمان انجام محاسبات با استفاده پردازنده 8 هستهای با سرعت 3.4 GHz و GD 61 حافظه موقت، در این شیله در مقطع میانی محفظه و عمود بر محور طولی نشان داده شده است. منظور از مقطع میانی محفظه و عمود بر محور طولی نشان داده شده است. منظور از مقطع میانی محفظه و عمود بر محور طولی نشان داده شده است. منظور از مقطع میانی محفظه و عمود بر محور طولی نشان داده شده است. منظور از مقطع میانی محفظه و عمود بر محور طولی نشان داده شده است. ممنظور از مقطع میانی محفظه و عمود بر محور طولی نشان داده شده است. معله در این شکل معاه بیشتر از پیداست، با استفاده از سینتیک یک مرحلهای، مقدار دمای شعله بیشتر از مقطع ایش منده و مقدار متوسط خطای محاسبه شده در میدان حرل 11 درصد است. مقدار دمای پیش بینی شده با استفاده از سینتیک یک مرحلهای محاسبه شده در میدان مرحلهای محاسبه شده در میدان معدار دمای شعله در معدار دمای شعله در معدار دمای پیش بینی شده با استفاده از سینتیک یک مرحلهای محاسبه شده در میدان معدار می است.



Fig. 3 Comparison of temperature radial distribution with different grids using CH₄/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 CH₄/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. 5 Comparison of radial distribution of CO2 mole fraction with different kinetics using CH4/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 پیش بینی شده برابر با 1747 K بوده و مقدار خطا در این حالت 9 درصد می باشد. 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 پیش بینی کرده است.

دمای شعله در این حالت K لا 1604 پیش بینی شده است. از نمودار دما می توان برای محاسبه ضخامت ناحیه واکنش استفاده کرد. ناحیه واکنش ناحیهای است که نرخ انجام واکنش در آن صفر نباشد [14]. با پیش روی 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 می شود. با توجه به شکل مشخص است که ضخامت ناحیه واکنش در حدود 4 mm مرکزی محفظه احتراق ثابت است. به این ترتیب مشاهده می شود که توزیع دما در داخل شعله به صورت یکنواخت انجام می شود.

"شکل 5" نمودار توزیع گونه دیاکسیدکربن در همان مقطع را نشان می دهد. در این نمودار نیز مشخص است که سینتیک یک مرحلهای مقدار دیاکسیدکربن را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی کرده و مقدار خطا در این حالت نسبت به نتایج تجربی 8 درصد می باشد. با استفاده از سینتیک دو مرحلهای مقدار خطا نسبت به نتایج تجربی در حدود 4 درصد می باشد. این در حالی است که با استفاده از سینتیک 20 DRM2 مقدار دی اکسیدکربن با حالت واقعی تطابق مناسبی داشته است و مقدار پیش بینی شده در این حالت برابر با 0.246 می باشد. همان گونه که در این نمودار مشخص است در 8=r mm که مواد واکنش دهنده هنوز به ناحیه واکنش وارد نشدهاند، مقدار واکنش، دی اکسیدکربن تولید شده و مقدار آن در محصولات احتراق در ناحیه داخلی شعله به بیشینه می رسد.

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 پیش بینی شده در حالی که مقدار تجربی آن

0.03 است. همچنین در این حالت، تغییرات گونه مونوکسیدکربن از شعاع mm تا mm میباشد در حالی که در مطالعه تجربی این تغییرات از شعاع mm 1 تا mm است. با استفاده از سینتیک DRM22 مقدار بیشینه گونه مونوکسیدکربن برابر با مقدار تجربی پیشبینی شده است؛ اما در این حالت هم مشاهده می شود که تغییرات گونه مونوکسید کربن از شعاع mm 4 تا 6 mm رخ می دهد. با توجه به نمودار توزیع گونه مونو کسید کربن مشخص است که در r=6 mm مقدار خطا بسیار ناچیز (نزدیک صفر) بوده در حالی که در محدوده r=4 mm تا r=2 mm مقدار خطا از 50 درصد تا 75 درصد متغیر می باشد. 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 می تواند منجر به این خطا گردد. عدد اشمیت گونه مونو کسید کربن در دمای 300 K برابر با 0.84 می باشد در حالیکه در کار حاضر این مقدار برای تمامی گونه ها 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، كوچكتر خواهد بود؛ زيرا مقدار ويسكوزيته ديناميكي فقط تابعي از دما می باشد. 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 می شود.

3-4- بررسی توزیع دما

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



Fig. 6 Radial distribution of CO mole fraction using CH_4/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 می ابد و در نزدیکی دیواره دما در محدوده 330 K قرار می گیرد. 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 می شود. "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 (\emptyset)، برحسب کسر مولی اکسیژن (β) 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^۱ قرار گرفته و شعلهای تشکیل نمیشود. معیار خاموشی شعله در این پژوهش، کاهش دمای ناحیه واکنش به مقادیر کمتر از 500 K

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

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

¹ Extinction

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 می شود، کاهش یافته و ناحیهای که در آن شعله لولهای پایدار تشکیل می شود باریک می شود و تنها در نسبتهای همارزی کم و مخلوط رقیق، شعله لولهای پایدار تشکیل می شود. دلیل این امر را می توان با کمک دو عدد لوییس (Le) و دامکلر (Da) بهصورت فیزیکی توجیه کرد. ساختار شعله غیر پیشآمیخته به عدد دامکلر وابسته مى باشد [6]. اين 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 ≤ Da_{ext} باشد، خاموشی شعله رخ خواهد داد. Daext عدد دامکلر بحرانی بوده که بیشترین مقدار عدد دامکلر است که به ازای آن شعله در محدوده خاموشی قرار می گیرد. در این پژوهش مدل احتراقی واکنشگاه نیمه مخلوط بکار رفته است. مدل واکنشگاه نيمه مخلوط عدد دامكلر را محدود و در مرتبه واحد فرض ميكند [20]. به عبارتی زمان اختلاط و انجام واکنش شیمیایی را هم مرتبه در نظر می گیرد. در این صورت عدد دامکلر هم از مرتبه عدد دامکلر خاموشی بیشتر بوده و شعله تشکیل می شود 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 لوييس مهم مىشود. با توجه به اينكه احتراق بهصورت غير پیشآمیخته است، دو عدد لوییس، یکی برای سوخت و یکی برای اکسیدکننده، تعریف می شود. اگر عدد لوییس هر یک از دو طرف، غیر واحد باشد، احتمال وقوع ناپایداری بسیار افزایش خواهد یافت [19]. در محدوده , الفزايش عدد لوييس اكسيدكننده، ناحيه پايداری b
a_{ext} < Da < ∞ 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 می شود. در این حالت



Fig. 8 Mappings of various combustion regions for tubular flame شکل 8 نواحی مختلف احتراق در شعله لولهای

با افزایش عدد لوییس، نفوذ حرارتی واکنش دهنده ها افزایش مییابد؛ اما به نظر می رسد واکنش دهنده ها از نفوذ جرمی با سرعت کافی برای جلوگیری از نوسانات دما که به دلیل افزایش نفوذ حرارتی ایجاد شده است، ناتوان می باشند [19]. به این ترتیب شعله ناپایدار می شود. طبق مطالعات تجربی [21]، این ناپایداری در نسبتهای هم ارزی بزرگ رخ می دهد. در این شرایط شعله در نسبتهای هم ارزی نزدیک به حد خاموشی پایدار می شود.

در کسر مولی اکسیژن برابر با 1 که از اکسیژن خالص بهعنوان اکسیدکننده استفاده شده است، به ازای نسبتهای هم ارزی در محدوده 0.1 تا 0.2 شعله لولهای پایداری تشکیل می شود. بنابراین به نظر می رسد با وجود مزایایی که احتراق در حضور اکسیژن خالص به عنوان اکسیدکننده نسبت به هوا دارد، اما ناحیه پایداری شعله به شدت کاهش یافته و در محدوده باریکتری شعله لولهای پایدار و یکنواخت تشکیل می شود. دلیل این امر همان گونه که اشاره شد، افزایش عدد لوییس اکسیدکننده و ناتوانی واکنش دهندهها برای جلوگیری از نوسانات دمایی می باشد. با افزایش نفوذ حرارتی، نوسانات دمایی شعله افزایش یافته و شعله ناپایدار می شود. در نسبتهای هم ارزی کمتر و نزدیک به حد خاموشی، نوسانات دمایی کاهش یافته و شعله در محدوده پایداری قرار می گیرد.

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.

4-5- پایداری شعله لولهای در احتراق متان-اکسیژن و در حضور دیاکسیدکربن به عنوان رقیقکننده

در قسمت قبل پایداری شعله لولهای زمانی که از هوا به عنوان 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 کاملا شبیه حالت قبل است و پایداری شعله در حضور دیاکسیدکربن و به ازای مقادیر مختلف کسر مولی اکسیژن، مورد بررسی قرار می گیرد.

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 دی اکسید کربن آورده شده است. 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. متوسط خطا بین نتایج عددی و تجربی 19 درصد میباشد.

با افزایش کسر مولی اکسیژن و کاهش دی اکسیدکربن، محدوده پایداری شعله لولهای کاهش مییابد. رفتار نمودار بهدست آمده در این حالت کاملا شبیه به زمانی است که از نیتروژن بهعنوان رقیق کننده استفاده شده است. در این حالت نیز با افزایش کسر مولی اکسیژن در اکسیدکننده، عدد لوییس اکسیدکننده افزایش یافته و به دلیل نوسانات دمایی شعله ناپایدار می شود. با کاهش نسبت همارزی، شعله در محدوده پایدار قرار می گیرد.

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 است که دیاکسیدکربن نسبت به نیتروژن نفوذ حرارتی کمتر دارد. در نتیجه عدد لوییس دیاکسیدکربن کمتر از عدد لوییس نیتروژن میباشد [6]. به این ترتیب و با توجه به استدلالهای ذکر شده در حضور دیاکسیدکربن در نسبتهای هم اتفاقی مشابه رخ میدهد و شعله در حضور دیاکسیدکربن در نسبتهای هم ارزی بالاتری به ناحیه احتراق ناپایدار وارد میشود.

به این ترتیب به نظر می سد محدوده پایداری شعله لولهای در حضور دی-اکسیدکربن به عنوان رقیق کننده، بزرگتر است. دلیل این امر پایین تر بودن نفوذ حرارتی دی اکسیدکربن نسبت به نیتروژن می باشد. بنابراین زمانی که از اکسیژن در حضور دی اکسیدکربن به عنوان اکسیدکننده استفاده می شود، عدد لوییس اکسیدکننده کمتر از زمانی است که از هوا به عنوان اکسیدکننده استفاده می شود. به این ترتیب با استفاده از $_2O_2+CO_2 / 4$ ، نوسانات دمایی در نسبتهای هم ارزی بزرگتری شروع شده و محدوده پایداری شعله نسبت به حالت $_2O_2 / 4$ افزایش می یابد. البته با افزایش کسر مولی اکسیژن و برای مقادیر بیشتر از 200، با کاهش کسر مولی دی اکسیدکربن و نیتروژن در اکسیدکننده، محدوده پایداری شعله لوله ای در هر دو حالت بسیار به یکدیگر نزدیک می شود.



Fig. 9 Mappings of various combustion regions for tubular flame in presence of $\mbox{\rm CO}_2$

شکل 9 نواحی مختلف احتراق در شعله لولهای در حضور دیاکسیدکربن



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 شكل 10 مقايسه نواحى مختلف احتراق در شعله لولهاى براى دو اكسيدكننده N_2/O_2 و O_2/O_2

5- جمع بندی و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، شعله لولهای در میدان جریان چرخشی به صورت عددی شبیهسازی شد. در مدل ارائه شده فرایندهای احتراق غیر پیش آمیخته، مدل اغتشاشی و تشعشعی لحاظ شده است. هدف اصلی از این شبیهسازی، تعیین ساختار و محدوده پایداری شعله لولهای و بررسی عوامل تأثیر گذار بر پایداری شعله می اشد.

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 1.0 تا 0.2 پایدار میشود. با اضافه کردن دی اکسیدکربن 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 علايم

a	قطر محفظه احتراق (mm)
Ľ	ضریب نفوذ جرمی (m²s ⁻¹)
Da	عدد دامکلر
h_s	انتالپی محسوس (Jkg ⁻¹)
k	انرژی جنبشی اغتشاشی (Jkg ⁻¹)
i	طول محفظه احتراق (mm)
I	طول مشخصه (mm)
Le	عدد لوييس

7- مراجع

- [1] S. Ishizuka, Characteristics of Tubular Flames, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 19, No. 3, pp. 187-226, 1993. S. Ishizuka, T. Takeno, A Tubular Flame Theory, Combustion and Flame,
- [2] 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.
- 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. [4]
- D. Shimokuri, S. Ishizuka, Flame stabilization with a tubular flame, [5] 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.
- B. Shi, D. Shimokuri, S. Ishizuka, Reexamination on methane/oxygen [7] combustion in a rapidly mixed type tubular flame burner, Combustion and Flame, Vol. 161, No. 5, pp. 1310-1325, 2014.
- J. Bibrzycki, T. Poinsot, Reduced chemical kinetic mechanisms for methane [8] combustion in O2/N2 and O2/CO2 atmosphere, Working note ECCOMET WN/CFD/10/17, CERFACS, 2010.
- 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. Poinsot, D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion, Second edition, pp. 478-510, Philadelphia, U.S.A: Edwards, 2005.
- [15] H. K. Versteeg, W. Malalasekra, 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.

فشار (kgm⁻¹s⁻²) Р $(kgm^{-2}s^{-3})$ نرخ متوسط گرمای حاصل از احتراق ġ عدد رينولدز Re بخش ثابت جمله چشمه تشعشع (Jkg⁻¹) R_u تابعی در جمله چشمه تشعشع (Jkg⁻¹K⁻⁴) R_p عرض ورودی نازل (mm) S نرخ انتقال حرارت تابشی (Jkg⁻¹) Sh جمله چشمه جرقه STh دما (K) Т سرعت (ms⁻¹) U; سرعت مشخصه (ms⁻¹) V ارتفاع ورودی نازل (mm) w کسر جرمی گونهها Y علايم يونانى ضریب نفوذ حرارتی مولکولی (m²s⁻¹) α کسر مولی اکسیژن β تابع دلتاي كرونكر δ لزجت دینامیکی (kgm⁻¹s⁻¹) μ (s^{-1}) فر کانس اضمحلال انرژی جنبشی اغتشاشی (ω (kgm^{-3}) نرخ متوسط گونه kام $\overline{\dot{\omega}}_k$ چگالی (kgm⁻³) ρ نسبت همارزی Ø

kام

زيرنويسها

مربوط به گونه	k
راستای i	i
راستای j	j
مؤثر	Eff