Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(9) (2021) 1169-1172
DOI: 10.22060/mej.2021.18906.6915

Numerical Investigation of the Influence of Burner's Bluff Body on Air-Fuel Mixing and Reaction

A. Asefi, J. Mahmoudimehr*

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

ABSTRACT: One way to improve air-fuel mixing in a gas diffusion flame is to produce targeted vortices and circulate the flow using a bluff body. In this study, the influences of radius, thickness, and location of a disk-shaped bluff body on the performance of a methane gas diffusion flame are numerically studied. This investigation is carried out under both cold mixing and hot mixing (with combustion reaction) conditions. The present simulation is verified against experimental data. The results show the substantial influence of the mentioned parameters on the size and intensity of downstream vortices, and a direct dependence is observed between the sizes of inner and outer recirculation zones and air-fuel mixing. It is also observed that the flow pattern and level of air-fuel mixing are more dependent on the bluff body's radius than its thickness. Based on the hot mixing simulation results and regarding the dependence between the rates of the chemical reaction and turbulence mixing, the higher rate of air-fuel mixing is associated with the decreased flame length. Among the cases investigated, the bluff body with a radius of 6mm, the thickness of 5mm, and axial location of 5mm away from the air channel exit results in the best air-fuel mixing.

Review History:

Received: Aug. 24, 2020
Revised: Mar. 06, 2021
Accepted: Mar. 07, 2021
Available Online: Mar. 27, 2021

Keywords:

Gas diffusion flame
Bluff body
Air-fuel mixing
Numerical simulation.

1- Introduction

Mounting a Bluff Body (BB) at the burner head is a simple passive method which can substantially enhance the reactants mixing and combustion quality by inducing some targeted vortices downstream.

Various research works, mainly experimental, have been conducted to figure out the influence of BB on the burner performance. As a brief summary, it was observed that: A planar BB led to larger vortices, as compared to cylindrical and wedge-shaped BBs [1]. Increasing the cone angle of a conic BB resulted in larger and more elliptical vortices [2]. A tulip-shaped BB produced a more stable flame, as compared to a planar BB [3]. A larger diameter of a disk-shaped BB resulted in a shorter flame [4]. Targeted downstream vortices could enhance turbulence and air-fuel mixing [5]. The size of vortices was highly affected by the BB obstruction ratio [6]. Mounting a BB 10mm after the air channel exit resulted in larger vortices and a more stable flame [7].

This study numerically investigates the influences of thickness, radius, and location of a disk-shaped BB on air-fuel mixing and properties of resulting gas diffusion flame. Furthermore, the sensitivity of the results to the mentioned variables is analyzed. To the authors' knowledge, such quantitative study and sensitivity analysis have not been addressed in the literature.

2- Methodology

A gas diffusion burner (shown in Fig. 1), with the specifications reported in Ref. [7], is considered as the case study. Governing equations and simulation approaches are briefly described in this section. Methane oxidation is assumed to be single-step. The mass, momentum, energy, and species

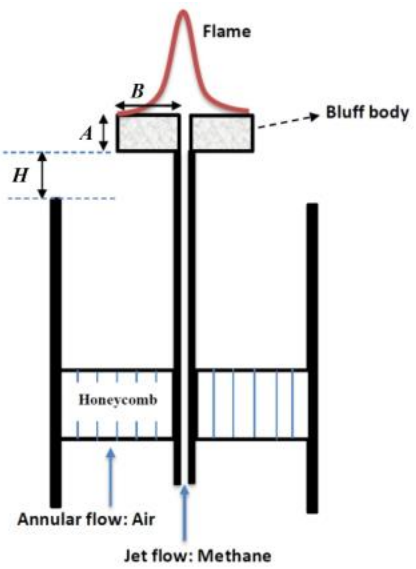


Fig. 1. Schematic view of the burner

*Corresponding author's email: mahmoudimehr@guilan.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

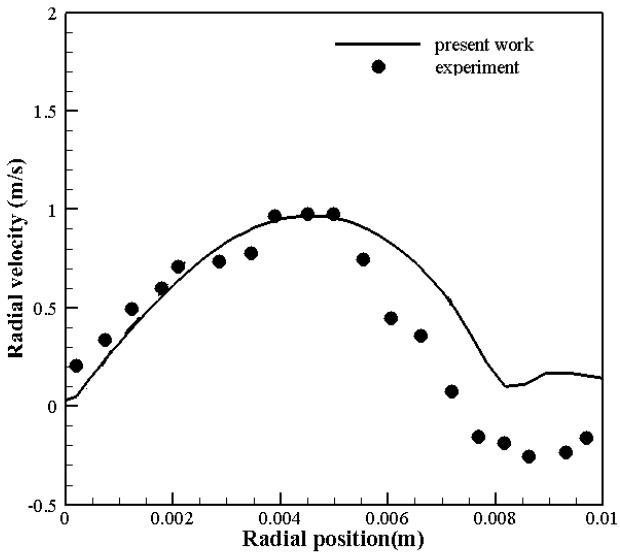


Fig. 2. Verification study: radial velocity on the line perpendicular to the axis and 2mm away from BB (fuel and air inlet velocities are 10m/s and 5.84m/s, respectively)

transport equations are shown in Eqs. (1) to (4), respectively [8]. In which, μ_t, Sc_t and Pr_t are turbulent viscosity, Schmidt and Prandtl numbers. Y, h and $S_{Reaction}$ represent species molar fraction, enthalpy, and reaction heat source, respectively. R denotes the rate of creation of species and is obtained from the Eddy Dissipation model [9]. The fluctuation term (last term) in Eq. (2) is modeled using the k-ω (SST) turbulence model [10]. $S_{Radiation}$ is the radiation heat source which is calculated by Discrete Ordinates (DO) approach [11]. The governing equations are solved via a finite volume scheme by using ANSYS Fluent software.

To verify the present simulation, it is compared with the experimental data of [7]. Fig. 2 shows a good agreement between the current simulation and the experimental data.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i'u_j'}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sum_k\left(K+\frac{c_p\mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sum_k h_k\left(\rho D_k+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right)+S_{Reaction}+S_{Radiation} \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_k)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\rho D_k+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right)+R_k \tag{4}$$

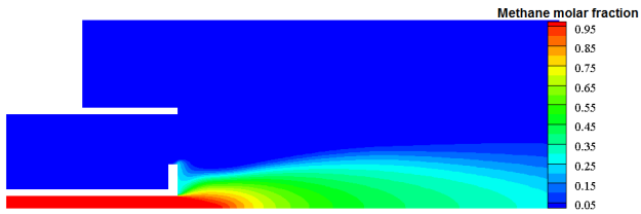


Fig. 3. Contours of methane molar fraction

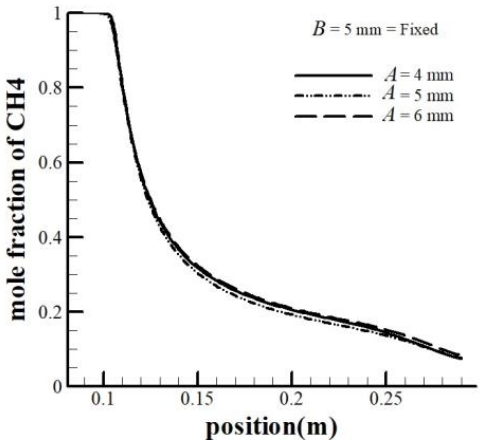


Fig. 4. Effect of BB thickness on methane drop along the axis

3- Results and Discussion

The burner has been numerically simulated for the different set values of BB thickness, BB radius, and the gap between BB and air inlet (designated with "A", "B", and "H" in Fig. 1, respectively). Contours of methane molar fraction (for air velocity of 3.75 m/s, fuel velocity of 10m/s, and BB thickness and radius of 5mm) are shown in Fig. 3. The steeper the drop of methane along the burner centerline (or axis), the greater the diffusion of surrounding air into the fuel. Therefore, the rate of fuel drop along the axis can be considered as a mixing quality indicator. The influences of BB thickness and radius are illustrated in terms of methane molar fraction in Figs. 4 and 5, respectively. These figures indicate that the air-fuel mixing is more affected by BB thickness than BB radius. Fig. 5 also shows that the air-fuel mixing improves as the BB radius increases. To analyze this observation, the streamlines are illustrated for the smallest and largest BB radii in Figs. 6 and 7, respectively. These figures indicate that a larger radius resulted in larger inner and outer recirculation zones, thereby enhancing the air-fuel mixing. Similar analyses were carried out for the effect of BB location on the burner performance, and it was observed that from among the different locations, a gap of 5mm between the BB and the air inlet led to the best air-fuel mixing (or steepest drop in methane along the axis). The results are not repeated to be graphically shown for the sake of conciseness.

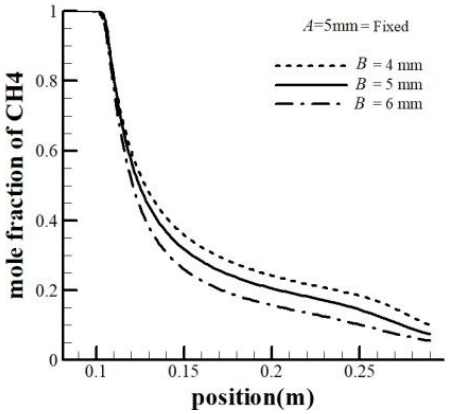


Fig. 5. Effect of BB radius on methane drop along the axis

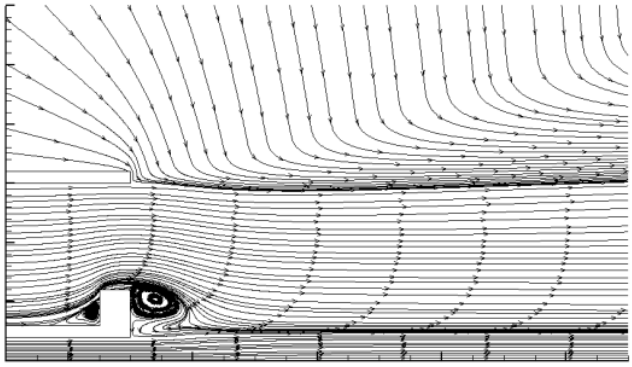


Fig. 6. Streamlines for BB radius of 4 mm

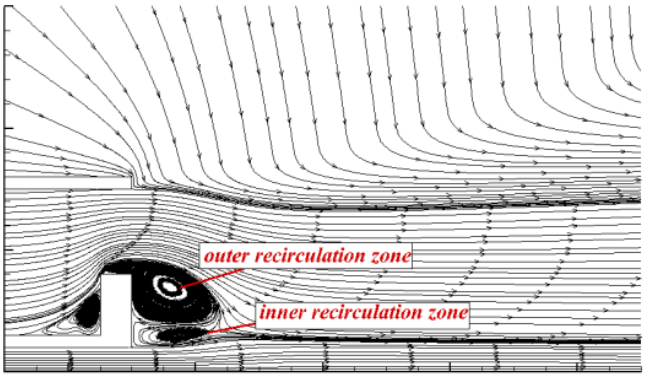


Fig. 7. Streamlines for BB radius of 6 mm

4- Conclusions

In this study, the influences of bluff body location and size on the performance of a gas diffusion burner were numerically investigated. The rate of methane drop (or oxygen rise) along the burner axis was considered as a measure of air-fuel mixing quality. The results indicated that the mentioned parameters had substantial effects on burner performance; furthermore, it was observed that the bluff body radius had a greater effect on the downstream vortices and air-fuel mixing, as compared to the bluff body thickness. Among the cases studied, a bluff body with a thickness of 5mm, a radius of 6mm, and a distance of 5mm from the air inlet resulted in the best air-fuel mixing.

References

[1] K. M. Kundu , D. Banerjee, D. Bhaduri, On flame stabilization by bluff- bodies, Journal of Engineering for Power, 102 (1980) 209-214.

[2] H. K. Ma, J. S. Harn, The jet mixing effect on reaction flow in a bluff-body burner, International journal of heat and mass transfer, 37(18) (1994) 2957-2967.

[3] I. Esquiva-Dano, H. T. Nguyen, D. Escudie, Influence of a bluff-body's shape on the stabilization regime of non-premixed flames, Combustion and Flame, 127(4) (2001) 2167-2180.

[4] P. Kumar, D. Mishra, Effects of bluff-body shape on LPG–H 2 jet diffusion flame, International Journal of Hydrogen Energy, 33(10) (2008) 2578-2585.

[5] M.M. Noor, A. P. Wandel, T. Yusaf., Analysis of recirculation zone and ignition position of non-premixed bluff-body for biogas MILD combustion, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 8(1) (2013) 1176-1186.

[6] R.W. Schefer, M. Namazian, J. Kelly, M. Perrin, Effect of confinement on bluff-body burner recirculation zone characteristics and flame stability, Combustion science and technology, 120(1-6) (1996) 185-211.

[7] T. Yiheng, et al., Effects of the position of a bluff-body on the diffusion flames: A combined experimental and numerical study, Applied Thermal Engineering 131 (2018) 507-521.

[8] T. Poinsot, D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion, Edwards Press (2005).

[9] A.Bahari, K. Atashkari, J. Mahmoudimehr, Multi-objective optimization of a municipal solid waste gasifier, Biomass Conversion and Biorefinery, (2020) 1-16.

[10] A. Karl, J. Chi Hung Fung, An improved SST k− ω model for pollutant dispersion simulations within an isothermal boundary layer, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 179 (2018) 369-384.

[11] M. Rasouli, J. Mahmoudimehr, Minimization of the Emission of Pollutants along with Maximization of Radiation from An Air-Staged Natural Gas Flame, Modares Mechanical Engineering 16 (7) (2016) 207-218 (in Persian).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Asefi, J. Mahmoudimehr, Numerical Investigation of the Influence of Burner's Bluff Body on Air-Fuel Mixing and Reaction, Amirkabir J. Mech Eng., 53(9) (2021) 1169-1172.

DOI: 10.22060/mej.2021.18906.6915

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۹، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۹۸۱ تا ۴۹۹۸
DOI: 10.22060/mej.2021.18906.6915

بررسی عددی تأثیر زائده سرمشعل بر اختلاط و واکنش سوخت و هوا

امین آصفی، جواد محمودی‌مهر*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

خلاصه: یکی از روش‌های بهبود اختلاط سوخت و هوا در یک شعله نفوذی گازی، تولید گردابه‌های هدفمند و ایجاد چرخش در جریان به کمک مانع سرمشعل است. در مطالعه حاضر، به بررسی عددی تأثیر شعاع، ضخامت و محل مانع جریان دیسکی‌شکل بر عملکرد یک مشعل نفوذی گازی با سوخت متان پرداخته می‌شود. این بررسی هم در شرایط اختلاط سرد و هم در شرایط اختلاط گرم (با فعالسازی واکنش احتراقی) انجام می‌پذیرد. صحت شبیه‌سازی حاضر از طریق مقایسه با اطلاعات تجربی ارزیابی می‌شود. نتایج حاکی از تأثیر محسوس پارامترهای مذکور بر بزرگی و قدرت گردابه‌های پایین‌دست مانع بوده و وابستگی مستقیمی میان وسعت گردابه‌های درونی و بیرونی و نرخ اختلاط سوخت و هوا مشاهده می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد حساسیت الگوی جریان و نرخ اختلاط سوخت و هوا به تغییر شعاع مانع در مقایسه با تغییر ضخامت آن بیشتر می‌باشد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های اختلاط گرم و با توجه به وابستگی نرخ واکنش شیمیایی به نرخ اختلاط آشفتگی، اختلاط‌های سریعتر سوخت و هوا با کاهش طول شعله همراه می‌باشد. از میان هندسه‌های مورد بررسی، مانع دیسکی‌شکل با شعاع ۶ میلی‌متر، ضخامت ۵ میلی‌متر و در فاصله ۵ میلی‌متری از دهانه کانال هوا، بهترین نرخ اختلاط را موجب می‌شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۰۷

کلمات کلیدی:
شعله نفوذی گازی
مانع جریان
شبیه سازی عددی
اختلاط سوخت و هوا

۱- مقدمه

در گذشته، دغدغه مهم و اساسی در طراحی سیستمهای احتراقی، اطمینان از احتراق کامل بوده است. اما امروزه در طراحی مشعل‌ها به عنوان مؤلفه اصلی این نوع سیستمها، علاوه بر بیشینه‌سازی بازده احتراق و کمینه‌سازی میزان مصرف سوخت، کمینه‌سازی انتشار آلاینده‌ها یک ضرورت است [۱ و ۲]. مطالعات نشان داده است که اندازه و قدرت گردابه‌های چرخشی، تأثیر محسوسی بر کیفیت اختلاط واکنشگرها، میزان انتشار آلاینده‌ها، پایداری شعله و سایر ویژگی‌های آن دارد [۳]. یکی از راهکارهای مرسوم برای ایجاد گردابه‌های هدفمند، استفاده از مانع جریان در محل سرمشعل می‌باشد. در ادامه به مروری بر تحقیقات انجام پذیرفته در این زمینه پرداخته می‌شود.

از نخستین تحقیقات در این زمینه می‌توان به مطالعه تجربی کاندو و همکاران [۴] اشاره نمود. در این مطالعه، تأثیر هندسه مانع جریان (صفحه‌ای، گوه‌ای و سیلندری) بر گردابه‌های پایین‌دست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مانع صفحه‌ای‌شکل، وسیع‌ترین، و مانع سیلندری‌شکل کوچک‌ترین ناحیه چرخشی را ایجاد نموده است. مطالعه تجربی ما و هارن [۵] نشان داد که افزایش زاویه مخروط یک مانع جریان مخروطی شکل، منجربه بزرگ‌تر شدن و بیضوی‌شکل شدن گردابه‌ها می‌شود. شفر و همکاران [۶] به بررسی تجربی تأثیر مانع جریان بر گردابه‌های ایجاد شده در پایین‌دست آن پرداختند. نتایج این بررسی نشان‌دهنده رابطه مستقیم میان وسعت ناحیه چرخشی پایین‌دست و نسبت انسداد ناشی از مانع جریان بوده است. مطالعه تجربی اسکویوا و همکاران [۷] نشان داد که مانع جریان لاله‌ای‌شکل در مقایسه با مانع دیسکی‌شکل، تثبیت شعله بهتری را موجب می‌شود. مطالعه تجربی سزو و همکاران [۸] بر روی یک شعله نفوذی معکوس، که در آن یک جت هوای مرکزی توسط دوازده جت سوخت بوتان احاطه شده بود، نشان داد که با افزایش سرعت جت سوخت، تولید اکسید نیتروژن افزایش و پایداری شعله کاهش می‌یابد. سوب‌یسیاک و ونزل [۹] به بررسی تجربی تأثیر قطر نازل و نسبت هم‌ارزی سوخت و هوا بر ویژگیهای شعله پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که طول شعله با افزایش نسبت سرعت هوا به سوخت کاهش یافته و پایداری شعله با افزایش درصد پیش‌آمیختگی سوخت و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahmoudimehr@guilan.ac.ir

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

هوا بهبود می‌یابد. مطالعه تجربی هاریهاران و همکاران [۱۰] بر روی یک شعله پیش‌آمیخته آشفته نشان داد که شعله حاصل از سرمشعل بیضوی در مقایسه با سرمشعل دایروی، کوتاه‌تر بوده، تابش کمتری گسیل نموده و دمای ب‌یشینه بالاتری را موجب شده است. همچنین در هر دو مشعل، غلظت اکسید نیتروژن با افزایش نسبت هم‌ارزی کاهش یافته است. مطالعه تجربی کومار و میشرا [۱۱] نشان داد که در اثر افزایش قطر مانع‌جریان دیسکی‌شکل، طول شعله غیرپیش‌آمیخته کوتاه‌تر شده است. مطالعه تجربی ژن و همکاران [۱۲] بر روی یک شعله نفوذی معکوس آشفته با سوخت مایع نشان داد که ایجاد چرخش در هوای ورودی، منجربه پایداری بیشتر شعله و همچنین کوتاه‌تر شدن و عریض‌تر شدن آن می‌گردد. نتایج مطالعه عددی آشوک و آچاریا [۱۳] بر روی یک شعله پیش‌آمیخته غنی از هیدروژن نشان داد که ایجاد چرخش در واکنشگرهای ورودی به ناحیه احتراق موجب افزایش شدت آشفتگی و به تبع آن اختلاط بهتر سوخت و هوا و افزایش نرخ واکنش شده است. همچن‌ین مشاهده شد که با افزایش نرخ واکنش، دمای نواحی مرکزی شعله افزایش محسوسی یافته است. نتایج مطالعه تجربی هاشمی و همکاران [۱۴] نشان داد که افزایش طول نگهدارنده شعله منجربه افزایش دما و کاهش طول شعله شده است. محمد نور و همکاران [۱۵] به مطالعه عددی گردابه‌های ایجاد شده در اثر مانع‌جریان در یک شعله نفوذی حاصل از سوخت زیست‌گاز پرداختند و دریافتند که این گردابه‌ها باعث آشفتگی میدان جریان و اختلاط بهتر واکنشگرها می‌شود. مطالعه عددی وانگ و همکاران [۱۶] بر روی یک شعله پیش‌آمیخته نشان داد که چرخش واکنشگرها منجربه پایداری بیشتر شعله، اختلاط بهتر میان سوخت و هوا و البته کوتاه‌تر شدن و عریض‌تر شدن شعله می‌شود. ییهنگ و همکاران [۱۷] به صورت تجربی به بررسی تأثیر موقعیت مانع جریان بر ویژگی‌های ساختاری یک شعله نفوذی گازی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد زمانی که مانع جریان ۱۰ میلی‌متر جلوتر از خروجی کانال هوا قرار داشته باشد در مقایسه با زمانی که مانع در محل خروجی کانال هوا باشد، گردابه‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. همچنین، در مطالعه عددی و تجربی دیگری توسط ییهنگ و همکاران [۱۸] نشان داده شد که این جانمایی (یعنی فاصله ۱۰ میلی‌متری میان مانع جریان و خروجی کانال هوا) موجب بهبود پایداری شعله نیز می‌شود. مطالعه عددی موسوی و محمودی‌مهر [۱۹] نشان داد که تغییر ابعاد دهانه‌های ورودی سوخت و هوا می‌تواند تغییر محسوسی در بازده حرارتی و میزان انتشار آلاینده‌ها ایجاد نماید.

مرور انجام گرفته بر تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از یک مانع‌جریان در محل سرمشعل، به عنوان روشی مؤثر جهت ایجاد گردابه‌های هدفمند در جریان پایین‌دست و اختلاط بهتر سوخت و هوا، مورد توجه محققین مختلف بوده است. از جذابیتهای این روش غیرفعال، می‌توان به سادگی و کم‌هزینه بودن آن اشاره نمود. در راستای ادامه و تکمیل مطالعات گذشته، هدف از کار حاضر بررسی عددی تأثیر ضخامت و شعاع مانع‌جریان دیسکی‌شکل و محل قرارگیری آن بر میزان اختلاط سوخت و هوا و ویژگیهای یک شعله دیفیوژن گازی است. همچنین در مطالعه حاضر، میزان وابستگی عملکرد مشعل به متغیرهای مذکور مورد بحث قرار خواهد گرفت. وسعت گردابه‌های پایین‌دست مانع، نحوه تغییرات کسر مولی سوخت و هوا در امتداد محور مشعل و هندسه شعله از جمله معیارهایی است که در این بررسی مورد توجه قرار خواهد گرفت. ساختار مقاله در ادامه بدین شرح است: در بخش دوم به توصیف معادلات حاکم پرداخته می‌شود. بخش سوم، به نحوه شبیه‌سازی و صحت‌سنجی نتایج عددی اختصاص دارد. در بخش چهارم، نتایج تحقیق ارائه و مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت و درنهایت در بخش پنجم به جمع‌بندی نتایج پرداخته خواهد شد.

۲- معادلات حاکم

در این بخش به توصیف معادلات حاکم بر جریان واکنشی در شرایط پایا، شامل معادلات بقای جرم، بقای اندازه حرکت، بقای انرژی، معادله انتقال جرم گونه‌های شیمیایی و همچنین معادلات مربوط به مدلسازی آشفتگی و تابش پرداخته می‌شود.

بقای جرم:

معادله بقای جرم در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$\frac{\partial\left(\rho u_i\right)}{\partial x_i}=0 \qquad (۱)$$

بقای اندازه حرکت:

رابطه (۲) نشان‌دهنده معادله بقای اندازه حرکت در شرایط پایا و با صرف‌نظر از اثرات گرانش است. در این رابطه، μ گرانروی دینامیکی را نشان می‌دهد. همچنین جمله شامل سرعتهای نوسانی در جریان آشفته (جمله پایانی در سمت راست معادله)، به کمک مدل آشفتگی به متغیرهای متوسط‌گیری‌شده وابسته می‌شود [۲۰ , ۲۱].

$$\frac{\partial\left(\rho u_i u_j\right)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+ \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) \quad (۲)$$

بقای انرژی:

با صرف‌نظر از اثرات گرانش و اتلافات لزجتی، معادله بقای انرژی به صورت رابطه (۳) در می‌آید [۲۰ و۲۱]. در این رابطه، c_p نشان‌دهنده ظرفیت گرمایی در فشار ثابت، Pr_t عدد پرانتل آشفتگی، Y_k کسر جرمی گونه ، Sc_t عدد اشمیت آشفتگی، μ_t لزجت آشفتگی و D_k ضریب نفوذ جرمی گونه می‌باشند. همچنین، h_k و h به ترتیب نشان‌دهنده آنتالپی گونه و آنتالپی متوسط محلی می‌باشند که بر اساس روابط (۴) و (۵) تعیین می‌شوند. در رابطه (۳)، $S_{Reaction}$ و $S_{Radiation}$ به ترتیب نشان‌دهنده جملات چشمه)یا چاه(حرارتی ناشی از گرمای واکنش و تابش حرارتی بوده و به کمک رابطه (۶) و معادله انتقال تابشی تعیین می‌شوند. در رابطه (۶)، R_k ، $h_k^{\cdot}$ و $M_{W,k}$ به ترتیب نشان‌دهنده نرخ تولید یا نابودی، آنتالپی تشکیل و جرم مولکولی گونه می‌باشند.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sum_k\left(K+\frac{c_p\mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)+ \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sum_k h_k\left(\rho D_k+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right)+S_{Reaction}+S_{Radiation} \quad (۳)$$

$$h=\sum_k h_k Y_k \quad (۴)$$

$$h_k=\int_{T_{ref}}^{T} c_{p,k}\,dT \quad (۵)$$

$$S_{Reaction}=-\sum_k \frac{h_k^0}{M_{W,k}}R_k \quad (۶)$$

نرخ واکنش شیمیایی (مدل اتلاف گردابه‌ای):

در کار حاضر برای تعیین نرخ واکنش از مدل اتلاف گردابه‌ای استفاده شده است. در این مدل فرض می‌شود که سینتیک ش‌یمیایی بسیار سریع‌تر از نرخ اختلاط آشفتگی است و از این‌رو نرخ واکنش توسط اختلاط آشفتگی کنترل و محدود می‌شود [۲۲]. با فرض واکنش شیمیایی به صورت رابطه (۷)، در مدل اتلاف گردابه‌ای نرخ خالص تولید یا مصرف گونه‌ها برابر با حداقل مقادیر حاصل از دو رابطه (۸) و (۹) لحاظ می‌شود. در رابطه (۷)، ν' و ν''، به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب استوکیومتریک گونه شیمیایی در سمت واکنش‌دهنده‌ها و فراورده‌ها می‌باشد. در روابط (۸) و (۹)، زیرنویس R نشان‌دهنده واکنشگر و زیرنویس P نشان‌دهنده فراورده است. همچنین، k و ε نمایانگر انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی آشفتگی هستند.

A و B ضرایب تجربی هستند که به ترتیب برابر با ۴ و ۰/۵ درنظر گرفته شده‌اند [۲۳].

$$\sum \nu_k' M_{w,k} \rightarrow \sum \nu_k'' M_{w,k} \quad (۷)$$

$$R_k=\nu_k' M_{w,k} A\rho\frac{\varepsilon}{k}min\left(\frac{Y_R}{\nu_R' M_{w,R}}\right) \quad (۸)$$

$$R_k=\nu_k' M_{w,k} AB\rho\frac{\varepsilon}{k}\frac{\sum_p Y_p}{\sum_j \nu_j'' M_{w,j}} \quad (۹)$$

لازم به ذکر است در کار حاضر واکنش احتراق گاز متان، با ساده‌سازی، طبق رابطه (۱۰) به صورت یک‌مرحله‌ای درنظر گرفته شده است.

$$CH_4+2O_2\rightarrow CO_2+2H_2O \quad (۱۰)$$

معادله انتقال جرم گونه‌های شیمیایی:

رابطه (۱۱) نشان‌دهنده معادله انتقال جرم گونه‌های شیمیایی می‌باشد [۲۱].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_k)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\rho D_k+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right)+R_k \qquad (۱۱)$$

معادلات آشفتگی:

در کار حاضر برای مدلسازی آشفتگی از مدل k-ω(SST) استفاده شده است. روابط (۱۲) و (۱۳) به‌ترتیب معادلات انتقالی برای انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ مخصوص اتلاف در این مدل را نشان می‌دهند. مدل‌های آشفتگی k-ω در مسایلی همچون اختلاط جریانها و جریانهای با دنباله‌های قدرتمند تطابق بسیاری خوبی با نتایج تجربی نشان داده است. همچنین مدل k-ω(SST) در مقایسه با نوع استاندارد آن، شامل اصلاحاتی در تعریف لزجت آشفتگی است که منجربه برتری عملکرد آن در طیف وسیعی از جریانات در مقایسه با مدلهای k-ε و مدل استاندارد k-ω شده است [۲۴]. در بخش نتایج، مقایسه‌ای میان نتایج روش‌های مذکور در مطالعه موردی حاضر صورت خواهد پذیرفت.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-Y_k+S_k \qquad (۱۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\Gamma_\omega\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]+G_\omega-Y_\omega+D_\omega+S_\omega \qquad (۱۳)$$

در روابط فوق، G_k جمله تولید انرژی جنبشی آشفتگی تحت گرادیان‌های سرعت متوسط و Y_k نشان‌دهنده ترم اتلاف ویژه است. همچنین S_k و S_ω جمله‌های چشمه یا چاه می‌باشند. توصیف کامل این مدل آشفتگی به همراه معرفی ثوابت معادلات مربوطه در مراجع [۲۳ و ۲۴] صورت پذیرفته است.

معادله انتقال گرمای تابشی:

انتقال گرمای تابشی در مسائل احتراقی که در دسته مسائل دما بالای مهندسی قرار می‌گیرند، نقشی مهم ایفا می‌نماید [۲۵ و ۲۶]. صرف‌نظر نمودن از تابش در این مسائل می‌تواند خطاهایی به میزان بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس در مقادیر دما ایجاد نماید. این خطا خود می‌تواند منجربه خطاهایی محسوس در تخمین چگالی‌های محلی، انتقال گرما از شعله و انتشار آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن، که بسیار به دما وابسته هستند، شود [۲۷].

معادله انتقال تابشی در رابطه (۱۴) نشان داده شده است.

$$\nabla.\left[I(\vec{r},\vec{s})\vec{s}\right]+(\alpha+\sigma_s)I(\vec{r},\vec{s})=\alpha n^2\frac{\sigma T^4}{\pi}+\frac{\sigma_S}{4\pi}\int_0^{4\pi}I(\vec{r},\vec{s}')d\Omega' \qquad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴)، I نشان‌دهنده شدت تابش، $\vec{r}$ بردار مکان، $\vec{s}$ بردار جهت، α ضریب جذب تابشی، σ_s ضریب پخش، σ ثابت استفان بولتزمن، n ضریب شکست و $\grave{U}'$ نمایانگر زاویه فضایی می‌باشد. در کار حاضر از روش جهت گسسته برای حل معادله انتقال تابشی استفاده شده است. این مدل، اثرات جذبی و پخشی محیط واسط را درنظر می‌گیرد و برای هر سلول، در چند جهت گسسته، بسته به دقت مورد نظر، معادله انتقال تابشی را حل می‌نماید. جمله چشمه مربوط به تابش در معادله بقای انرژی بصورت رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود، که در این رابطه، A سطح جانبی سلول محاسباتی، و $\vec{n}$ بردار یکه عمود بر سطح را نشان می‌دهد [۲۸].

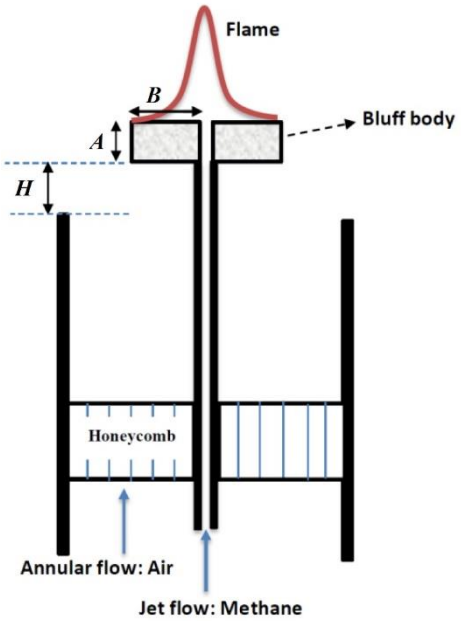
$$S_{Radiation}=\int_A\left(\int I\,\vec{s}.\vec{n}\,d\Omega'\right)dA \qquad (۱۵)$$

۳- شبیه‌سازی و صحت‌سنجی

در بخش حاضر، ابتدا به معرفی مطالعه موردی، سپس به مروری بر شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی و بررسی استقلال حل از شبکه، و درنهایت به صحت‌سنجی حل عددی پرداخته می‌شود.

۳- ۱- معرفی مطالعه موردی

مساله مورد مطالعه در مقاله حاضر عبارت است از یک مشعل نفوذی با سوخت گاز متان و اکسیدکننده هوا که طرحواره‌ای از آن در شکل ۱ و



شکل ۱. طرحواره مشعل و نمایش کانال‌های ورودی سوخت و هوا (بر اساس اطلاعات مراجع [۱۷ و ۱۸])

Fig. 1. Schematic views of the burner and its air and fuel channels (based on the information provided by [17, 18])

جدول ۱. اطلاعات هندسی مطالعه موردی (ابعاد به میلی‌متر)[۱۷ و ۱۸]

Table1. The geometric data of the case study (dimensions are in mm) [17, 18]

شعاع ورودی سوخت	۴
شعاع ورودی هوا	۲۴
عرض ناحیه حل	۱۸۰
طول ناحیه حل	۲۹۰

اطلاعات هندسی و شرایط سوخت و هوای ورودی به مشعل به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است [۱۷ و ۱۸]. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مساله بصورت متقارن محوری بوده و یک مانع‌جریان در سرمشعل قرار دارد. نمایی از شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شرط مرزی سرعت برای ورودی‌های سوخت و هوا و شرط مرزی فشار ثابت (برابر با فشار اتمسفر) برای مرزهای در معرض محیط درنظر گرفته شده است. همچنین،

جدول ۲. شرایط مرزی ورودی[۱۷ و ۱۸]

Table 2. Inlet boundary conditions [17, 18]

پارامتر ورودی	سوخت	هوا
سرعت محوری (متر برثانیه)	۱۰	۴-۶/۳-۵/۷۵
دما ورودی (کلوین)	۳۰۰	۳۰۰
کسر جرمی اکسیژن	۰	۰/۲۳۱۵
کسر جرمی متان	۱	۰

همه دیواره‌ها عایق (با شار حرارتی صفر) فرض شده‌اند.

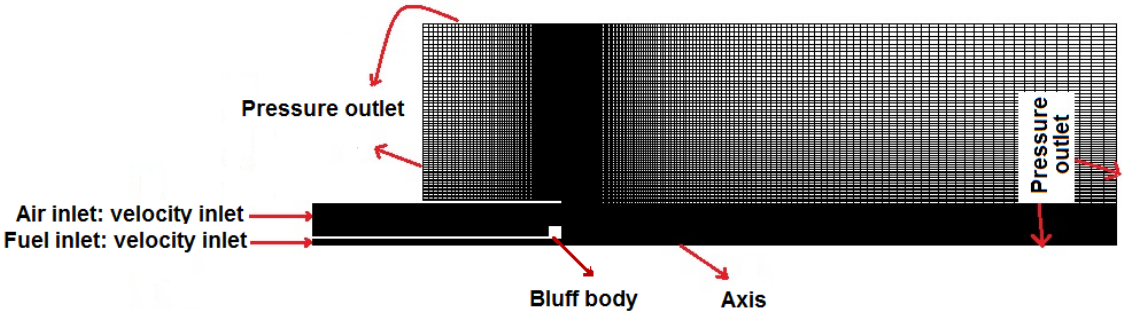
۳- ۲- شبیه‌سازی عددی و بررسی استقلال حل از شبکه

در کار حاضر برای شبکه‌بندی میدان حل از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است که به دلیل تقارن محوری مسئله، شبکه‌بندی به‌صورت دوبعدی و متقارن محوری انجام پذیرفته است. همچنین، شبیه‌سازی جریان واکنشی به روش حجم محدود و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و به‌صورت پایا انجام شده است. برای اصلاح سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده و گسسته‌سازی معادلات به روش بالادست مرتبه دوم صورت پذیرفته است.

شکل ۳ نشان‌دهنده مقادیر سرعت شعاعی روی خطی است که عمود بر محور تقارن بوده و در فاصله دو میلی‌متری پایین‌دست مانع جریان قرار دارد. نتایج مربوط به حالتی است که سرعت جت مرکزی صفر و سرعت هوا ۵/۸۴ متر بر ثانیه می‌باشد (سایر اطلاعات در بخش ۳-۱ ارائه شده است). با توجه به شکل ۳، نتایج حاصل از شبکه با تعداد سلول‌های ۱۷۵۰۰ به اندازه کافی مستقل از شبکه فرض شده و در ادامه مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در شکل ۴ مقایسه‌ای میان نتایج حاصل از برخی مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای رایج صورت پذیرفته است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، روش $k-\omega(SST)$ در مقایسه با سایر روشهای مورد بررسی انطباق بیشتری با نتایج تجربی نشان داده است و در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

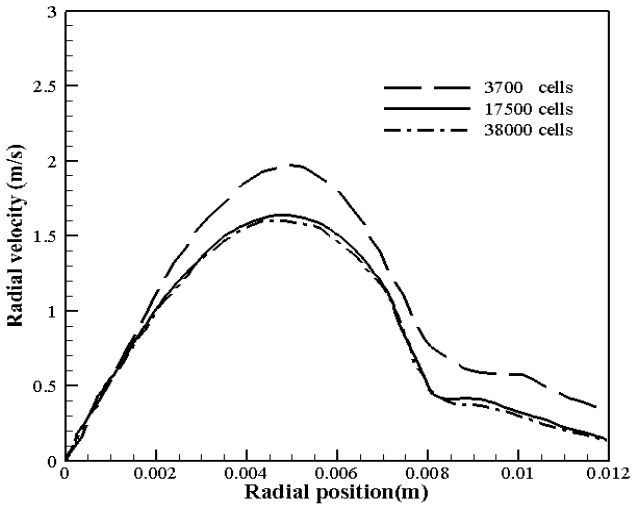
۳- ۳- صحت‌سنجی حل عددی

به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی عددی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی و عددی ییهنگ و همکاران [۱۷ و ۱۸] مقایسه شده



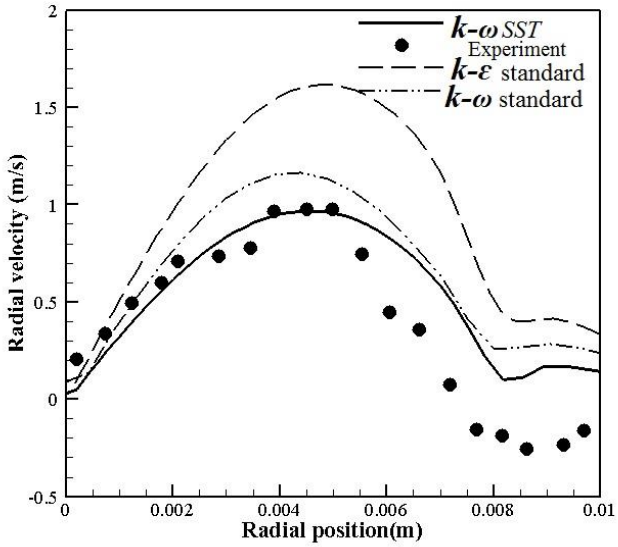
شکل ۲. ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی

Fig. 2. Computational domain and boundary conditions



شکل ۳. بررسی استقلال حل از شبکه بر اساس نمودار سرعت شعاعی روی خط عمود بر محور تقارن و در فاصله ۲ میلی‌متری از مانع جریان

Fig. 3. Solution mesh independency study based on the radial velocity on the line perpendicular to the axis and at a distance of 2mm from the bluff body



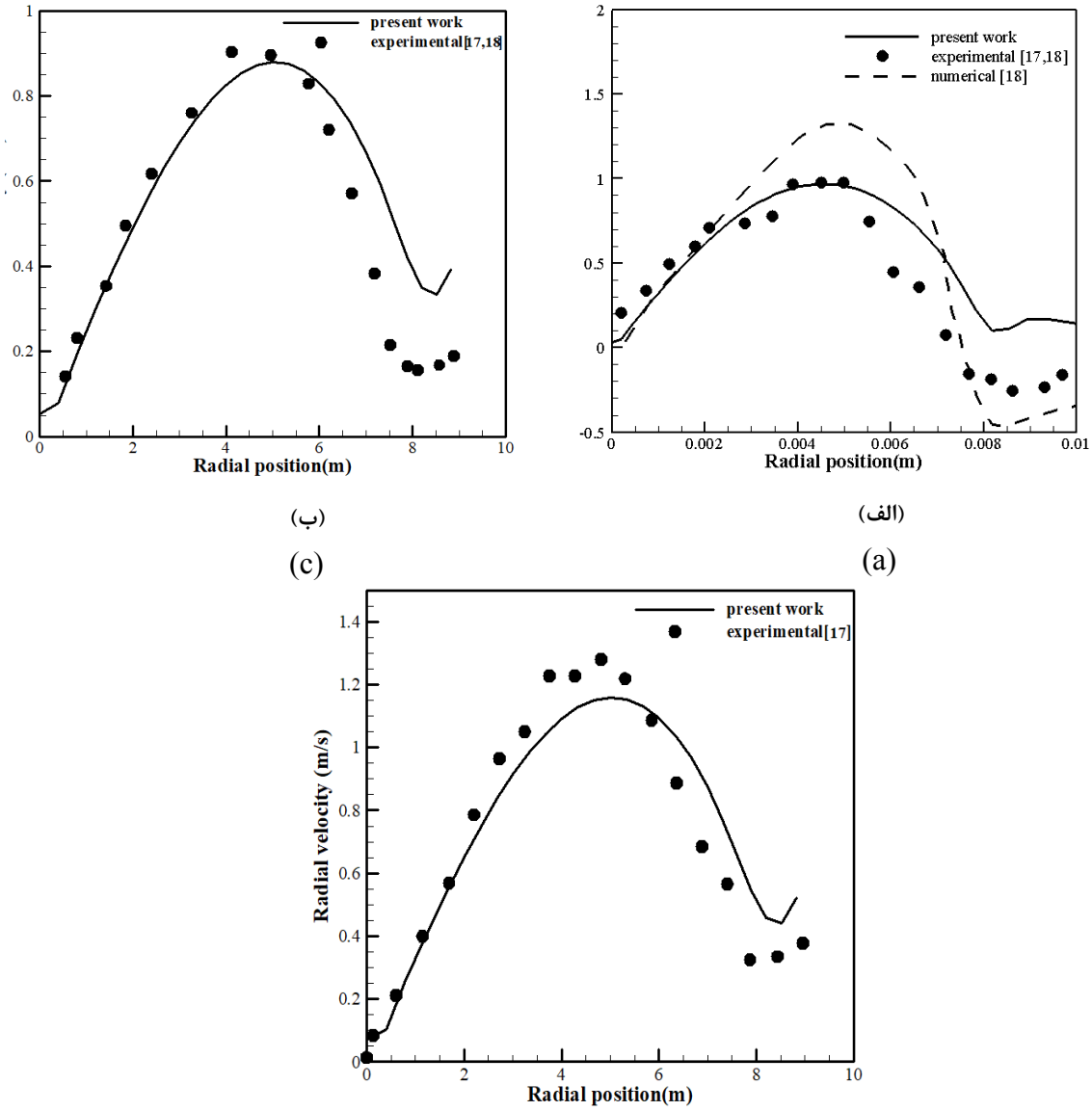
شکل ۴. مقایسه میان برخی روشهای آشفتگی براساس نمودار سرعت شعاعی روی خط عمود بر محور تقارن و در فاصله ۲ میلی‌متری از مانع جریان

Fig. 4. Comparison of some turbulence models based on the radial velocity on the line perpendicular to the axis and at a distance of 2mm from the bluff body

است. مورد مقایسه عبارت است از تغییرات سرعت شعاعی روی خطی که عمود بر محور تقارن بوده و در فاصله دو میلی‌متری پایین‌دست مانع‌جریان قرار دارد. این مقایسه به‌ازای مقادیر مختلف سرعت هوای ورودی و فاصله مانع‌جریان از لبه کانال هوا (فاصله H در شکل ۱) انجام پذیرفته و در شکل ۵ به نمایش درآمده است. لازم به ذکر است در این شکل، در همه موارد، ضخامت و شعاع مانع جریان دیسکی‌شکل برابر با ۵ میلی‌متر بوده و جت سوخت وجود ندارد. نتایج حاکی از تطابق مناسب میان شبیه‌سازی حاضر و نتایج تجربی و عددی ییهنگ و همکاران [۱۷ و ۱۸] می‌باشد.

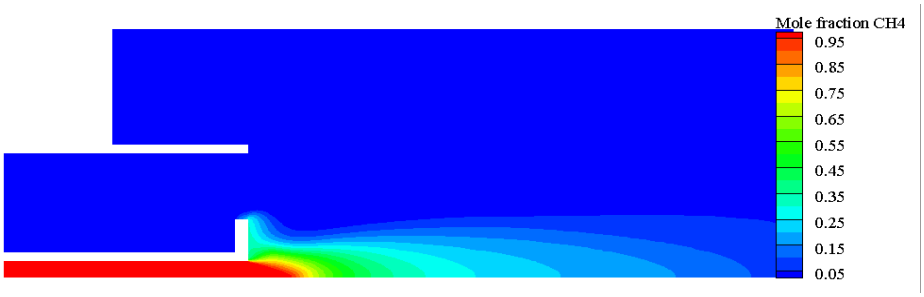
۴- بحث و بررسی نتایج

در ادامه، به بررسی و تحلیل تأثیر عوامل مختلف (شامل ابعاد مانع جریان، موقعیت مکانی مانع جریان و سرعت هوا) بر کیفیت اختلاط سوخت و هوا پرداخته می‌شود. این بررسی‌ها هم در شرایط اختلاط سرد (بدون فعال‌سازی واکنش شیمیایی) و هم در شرایط اختلاط گرم (با فعال‌سازی واکنش شیمیایی) صورت خواهد پذیرفت. لازم به ذکر است در همه حالات مورد بررسی، سرعت جت سوخت ثابت و برابر با ۱۰ متربرثانیه درنظر گرفته می‌شود.



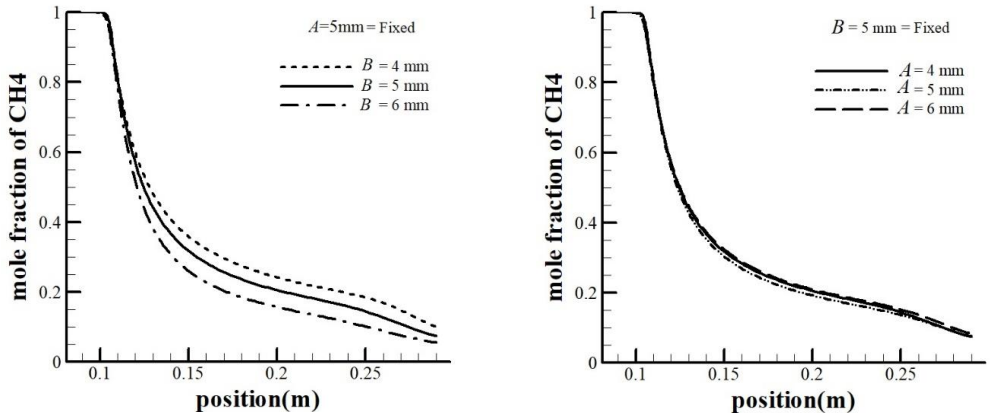
شکل ۵. مقایسه شبیه‌سازی حاضر و نتایج تجربی ییهنگ و همکاران [۱۷ و ۱۸] از نظر سرعت شعاعی روی خط عمود بر محور تقارن و در فاصله دو میلی‌متری پایین‌دست مانع‌جریان. الف) سرعت هوای ورودی برابر با ۵/۸۴ متربرثانیه و فاصله مانع از لبه کانال هوا برابر با صفر. ب) سرعت هوای ورودی برابر با ۵/۸۴ متربرثانیه و فاصله مانع از لبه کانال هوا برابر با ۱۰ میلی‌متر. ج) سرعت هوای ورودی برابر با ۷/۸۴ متربرثانیه و فاصله مانع از لبه کانال هوا برابر با ۱۰ میلی‌متر

Fig. 5. Comparison between the present simulation and the experimental data of Yiheng et al. [17,18], in terms of radial velocity on the line perpendicular to the axis and at a distance of 2mm from the bluff body. a) for air inlet velocity of 5.84m/s and a distance of 0mm between bluff body and air inlet. b) for air inlet velocity of 5.84m/s and a distance of 10mm between bluff body and air inlet. c) for air inlet velocity of 7.84m/s and a distance of 10mm between bluff body and air inlet



شکل ۶. خطوط همتراز کسر مولی متان در شرایط اختلاط سرد به‌ازای سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه و ضخامت و شعاع مانع جریان برابر با ۵ میلی‌متر

Fig. 6. Contours of methane molar fraction under cold mixing conditions for air inlet velocity of 3.75 m/s and bluff body thickness and radius of 5mm



(ب) (b) (الف) (a)

شکل ۷. نمودار کسر مولی متان روی محور تقارن به ازای سرعت هوای ۳/۷۵ متر بر ثانیه در شرایط اختلاط سرد:الف) تاثیراندازه ضخامت مانع ب) تاثیرتغییر اندازه شعاع مانع

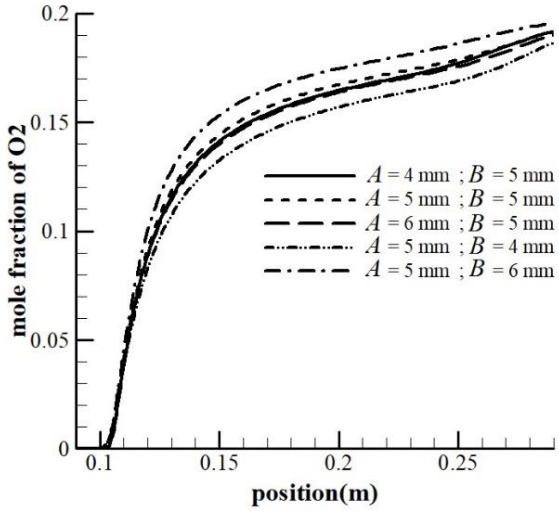
Fig. 7. Methane molar fraction on the axis under cold mixing conditions for air velocity of 3.75 m/s a) the effect of bluff body thickness b) the effect of bluff body radius

۴- ۱- تأثیر ابعاد مانع جریان بر میدان جریان و نرخ اختلاط سوخت و هوا

در این قسمت، به بررسی تأثیر ابعاد مانع جریان بر اختلاط سوخت و هوا و میدان جریان حاصل پرداخته می‌شود. ابتدا اختلاط سوخت و هوا سرد فرض می‌شود (یعنی واکنش فعال نمی‌شود) تا مساله صرفاً از جنبه هیدرودینامیکی مطالعه شود و سپس با فعالسازی واکنش، نتایج اثرات هیدرودینامیکی ابعاد مانع‌جریان روی کیفیت احتراق مورد بحث قرار می‌گیرد.

۴- ۱- ۱- تأثیر ابعاد مانع جریان: اختلاط سرد

در این بخش، ابتدا با ثابت فرض نمودن شعاع مانع‌جریان دیسکی‌شکل (که با نماد B در شکل ۱ نشان داده شده است) به بررسی تأثیر اندازه ضخامت مانع (که با نماد A در شکل ۱ نشان داده شده است) پرداخته می‌شود. سپس، با ثابت فرض نمودن ضخامت، تأثیر شعاع مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این مطالعات از طریق مقایسه خطوط جریان پشت مانع‌جریان و همچنین میزان کسر مولی متان و اکسیژن روی خط مرکزی (خط تقارن) انجام می‌پذیرد. به عبارتی، کاهش کسر مولی متان (با توجه به اینکه از مرکز وارد می شود) و افزایش کسر مولی اکسیژن (با توجه به اینکه از اطراف وارد می‌شود) روی خط مرکزی، به عنوان معیاری از کیفیت اختلاط درنظر گرفته شده است. به عنوان نمونه برای حالتی که ضخامت و شعاع مانع جریان هر دو ۵ میلی‌متر درنظر گرفته شده است، روند تغییرات کسر مولی متان، بصورت خطوط همتراز در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود کسر مولی متان در کانال سوخت ۱۰۰ درصد است و به‌تدریج با اختلاط هوا و متان در یکدیگر، کسر مولی متان در امتداد محور تقارن کاهش می‌یابد. برای ابعاد مختلف مانع‌جریان، نمودارهای کسر مولی متان و اکسیژن روی خط مرکزی در شکل ۷ نشان داده شده‌است. مقایسه شکل‌های ۷(الف) و (ب) نشان می‌دهد که تغییر اندازه شعاع مانع‌جریان



شکل ۸. کسر مولی اکسیژن روی محور تقارن به‌ازای ابعاد مختلف مانع در سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه

Fig. 8. Oxygen molar fraction on the axis for different bluff body dimensions and air velocity of 3.75 m/s

دیسکی‌شکل تأثیر بیشتری نسبت به تغییر اندازه ضخامت آن دارد. در نمودار ۷(الف) مشاهده می شود که در ضخامت ۵ میلی‌متر، کسر مولی متان روی خط مرکزی سریع‌تر کاهش می‌یابد، همچنین نمودار ۷(ب) نشان می دهد که به‌ازای شعاع ۶ میلی‌متر، کسر مولی متان سریع‌تر کاهش می‌یابد. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که در ضخامت ۵ میلی‌متر و شعاع ۶ میلی‌متر، اختلاط سریع‌تر رخ داده است.

در شکل ۸، نمودار کسر مولی اکسیژن روی محور تقارن بصورت همزمان برای ۵ هندسه مختلف نشان داده شده است. از مقایسه نتایج شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود هندسه‌هایی که منجربه کاهش سریع‌تر متان روی خط تقارن شده‌اند منجربه افزایش سریع‌تر اکسیژن روی محور تقارن (و به عبارتی نفوذ بیشتر هوای اطراف به سمت مرکز) نیز شده‌اند.

تأثیر ضخامت و شعاع مانع بر خطوط جریان به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات اندازه شعاع مانع تأثیر بیشتری بر خطوط جریان و گردابه‌های ایجاد شده بعد از مانع‌جریان گذاشته و در اثر هندسه با ضخامت ۵ میلی‌متر و شعاع ۶ میلی‌متر گردابه‌های قوی‌تر و بزرگ‌تری نسبت به سایر هندسه‌ها ایجاد شده است که می‌تواند موجب اختلاط بهتر سوخت و هوا و پایداری شعله شود. همانطور که در شکل ۱۰(ج) مشاهده می‌شود، به‌ازای ضخامت ۵ میلی‌متر و شعاع ۶ میلی‌متر، ناحیه چرخشی داخلی و همچنین ناحیه چرخشی بیرونی قوی‌تری در پشت مانع‌جریان ایجاده شده است که عاملی برای اختلاط بهتر سوخت و هوا است [۱۵].

این بررسی‌ها به‌ازای سرعت‌های هوای ۴/۵ و ۶ متربرثانیه نیز انجام پذیرفته است که الگوی کیفی مشابهی را در مقایسه با سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه نشان داده است و به همین دلیل از تکرار نتایج آن خودداری می‌شود. لازم به ذکر است در این سرعت‌ها نیز مانع‌جریان با ضخامت ۵ میلی‌متر و شعاع ۶ میلی‌متر منجربه اختلاط بهتر سوخت و هوا شده است.

۴- ۱- ۲- تأثیر ابعاد مانع جریان: در شرایط اختلاط گرم (بعد از فعالسازی واکنش)

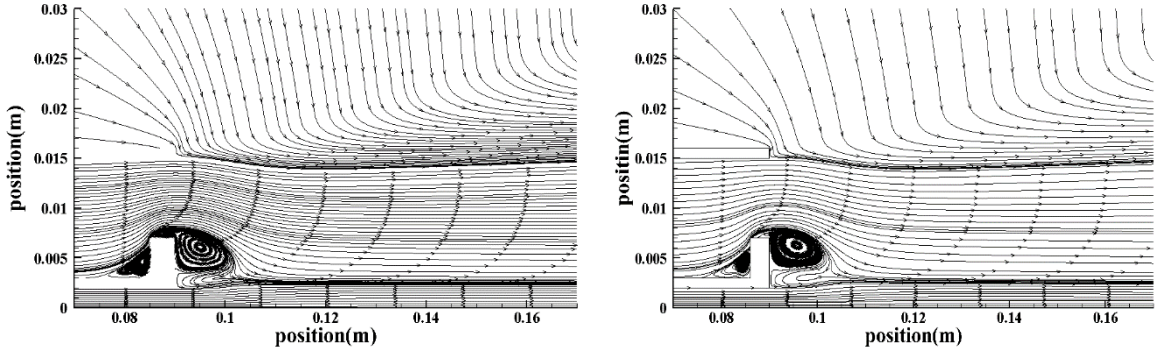
تاکنون، به بررسی تأثیر ابعاد مانع‌جریان بر اختلاط سرد متان و هوا پرداخته شد. در این بخش با فعالسازی واکنش احتراقی میان سوخت و هوا، به بررسی نتایج پرداخته می‌شود.

به عنوان نمونه برای حالتی که ضخامت و شعاع مانع‌جریان هر دو ۵ میلی‌متر است، روند تغییرات کسر مولی متان پس از فرایند احتراق، به صورت خطوط همتراز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود کسر مولی متان در کانال سوخت ۱۰۰درصد است و به‌تدریج با نفوذ هوا و متان در یکدیگر و همچنین در اثر واکنش احتراق، کسر مولی متان در امتداد محور تقارن کاهش می‌یابد.

نمودارهای کسر مولی متان حاصل روی محور تقارن برای ۵ هندسه مختلف، به‌ازای سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، به‌ازای مانع‌جریان با ضخامت ۵ میلی‌متر و شعاع ۶ میلی‌متر ، کسر مولی متان سریع‌تر کاهش می‌یابد. به‌عبارتی، در این هندسه اختلاط سریع‌تر صورت پذیرفته و طول شعله کوتاه‌تر است. این نتیجه با نتایج شبیه‌سازی اختلاط سرد (که در بخش ۴-۱-۱ ارائه شد) سازگار دارد.

۴- ۲- تأثیر مکان مانع جریان بر میدان جریان و نرخ اختلاط سوخت و هوا

در این بخش با ثابت فرض نمودن ابعاد مانع‌جریان (به میزان ضخامت ۵ میلی‌متر و شعاع ۶ میلی‌متر)، به بررسی تأثیر موقعیت مانع‌جریان (با معیار H در شکل ۱) پرداخته می‌شود. مسئله به‌ازای مقادیر متفاوت H (۰، ۵ و ۱۰ میلی‌متر) مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودار کسر مولی متان برای دو حالت اختلاط سرد (بدون فعالسازی واکنش) و گرم (بعد از فعالسازی واکنش) و به‌ازای موقعیت‌های مکانی مختلف مانع‌جریان در شکل ۱۳ ترسیم شده‌اند. با توجه به شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که به‌ازای موقعیت مکانی H برابر با ۵ میلی‌متر، نمودار کسر مولی متان سریع‌تر کاهش یافته و اختلاط سوخت و

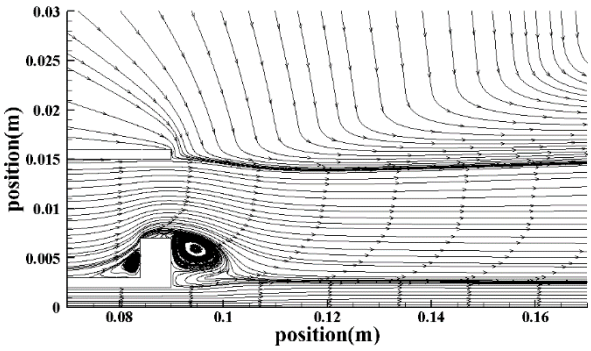


(ب)

(b)

(الف)

(a)

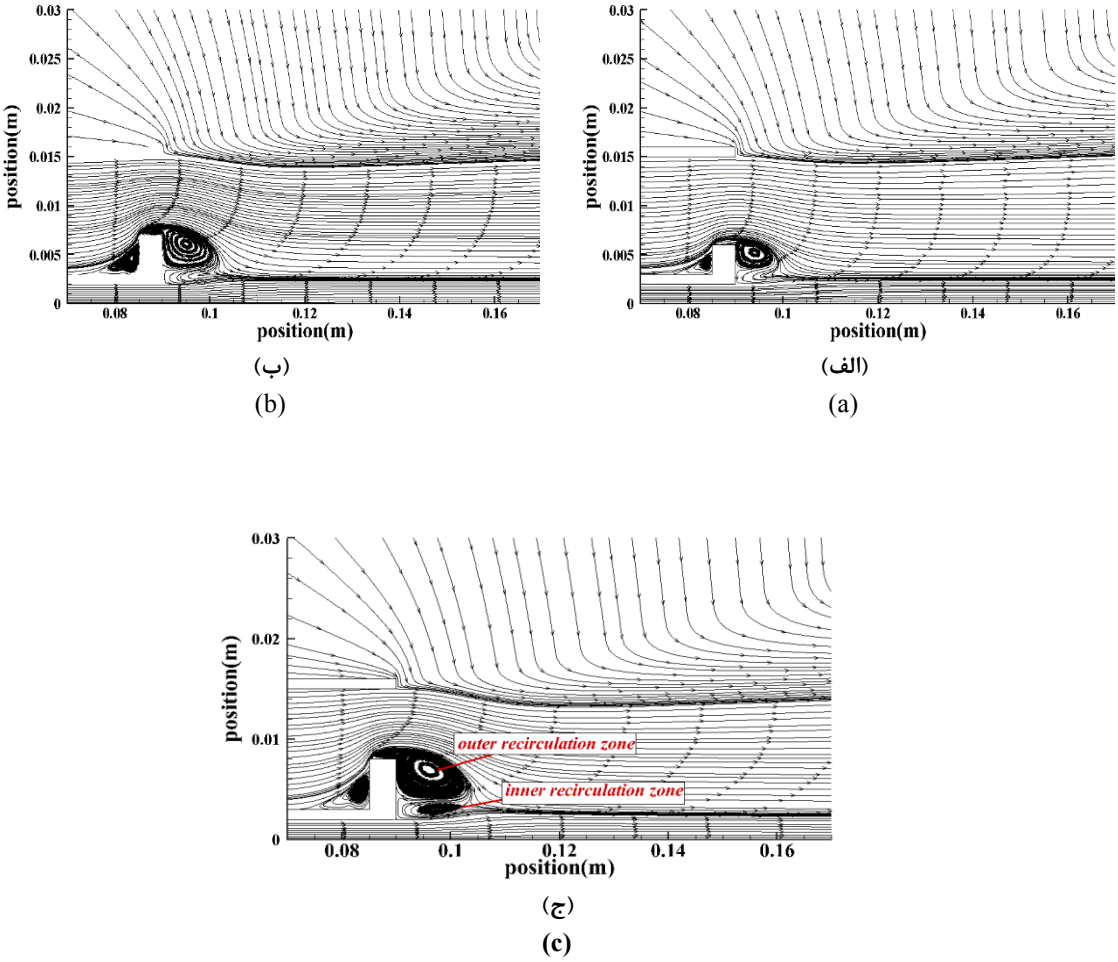


(ج)

(c)

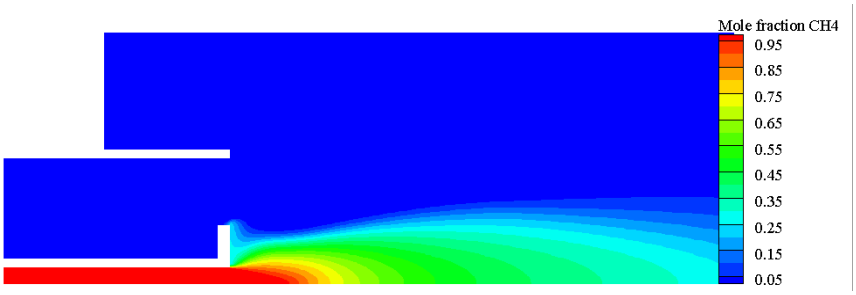
شکل ۹. خطوط جریان به‌ازای ضخامت‌های مختلف مانع سرمشعل (شعاع مانع در همه حالات برابر با ۵ میلی‌متر است). الف) ضخامت مانع برابر با ۴ میلی‌متر ب) ضخامت مانع برابر با ۵ میلی‌متر ج) ضخامت مانع برابر با ۶ میلی‌متر

Fig. 9. Streamlines for different bluff body thicknesses (bluff body radius in all cases is 5mm) a) for bluff body thickness of 4mm b) for bluff body thickness of 5mm c) for bluff body thickness of 6mm



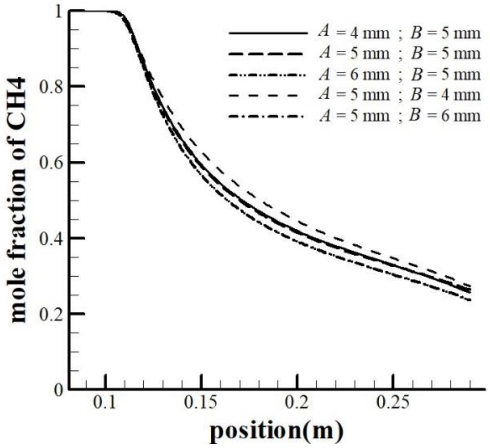
شکل ۱۰. خطوط جریان به‌ازای شعاع‌های مختلف مانع سرمشعل (ضخامت مانع در همه حالات برابر با ۵ میلی‌متر است). الف) شعاع مانع برابر با ۴ میلی‌متر ب) شعاع مانع برابر با ۵ میلی‌متر ج) شعاع مانع برابر با ۶ میلی‌متر

Fig. 10. Streamlines for different bluff body radii (bluff body thickness in all cases is 5mm) a) for a bluff body radius of 4mm b) for a bluff body radius of 5mm c) for a bluff body radius of 6mm



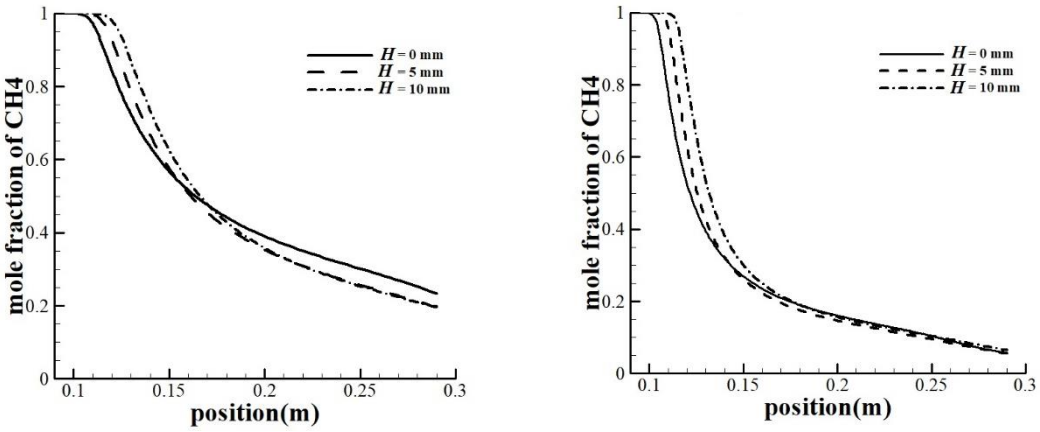
شکل ۱۱. خطوط همتراز کسر مولی متان در شرایط اختلاط گرم (با درنظرگیری واکنش) به‌ازای سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه و ضخامت و شعاع مانع جریان برابر با ۵ میلی‌متر

Fig. 11. Contours of methane molar fraction under hot mixing conditions (considering reaction) for air velocity of 3.75 m/s and bluff body thickness and radius of 5mm



شکل ۱۲. نمودار کسر مولی متان روی محور تقارن برای هندسه‌های مختلف و به‌ازای سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه (با فعالسازی واکنش)

Fig. 12. Methane molar fraction on the axis for different bluff body geometries and for air velocity of 3.75 m/s (reaction is activated)



(ب)

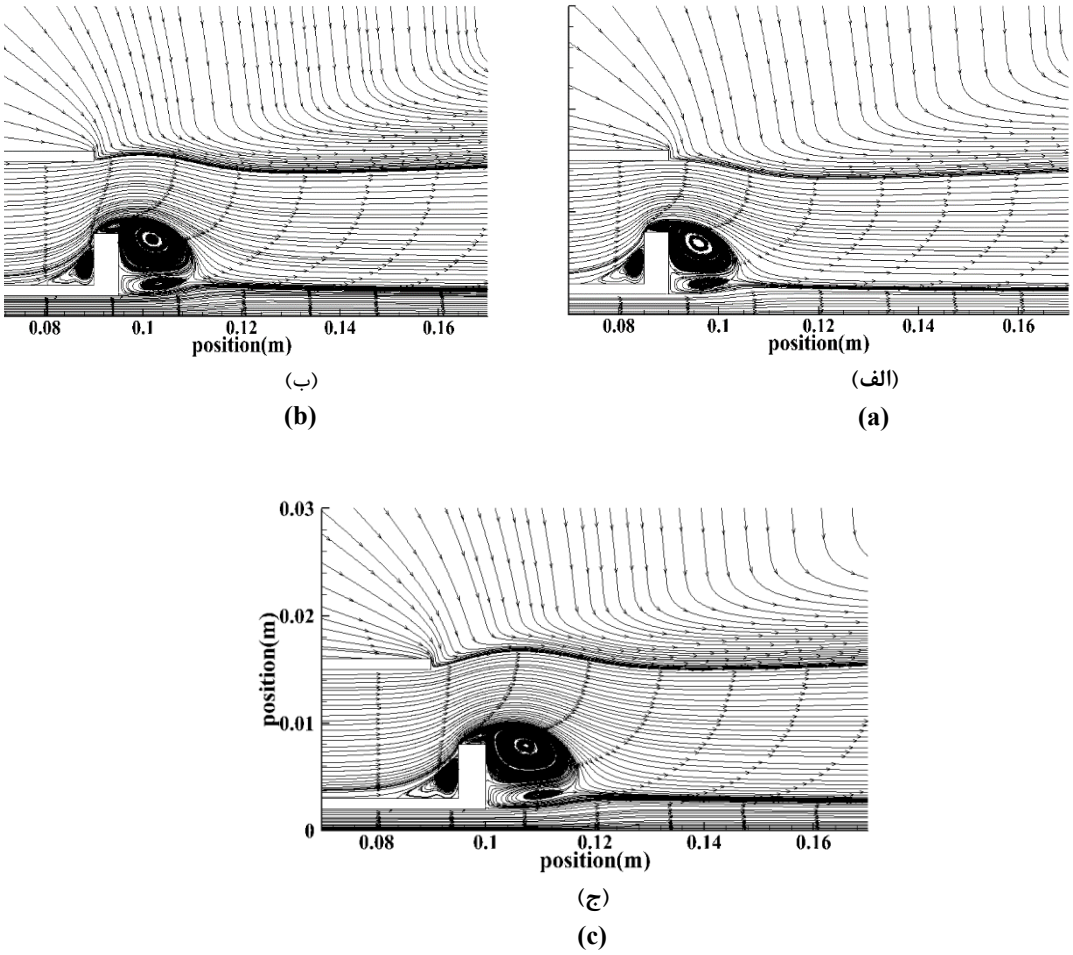
(b)

(الف)

(a)

شکل ۱۳. نمودار کسر مولی متان روی محور تقارن به‌ازای موقعیت‌های مکانی مختلف مانع‌جریان و در سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه در دو حالت: الف) اختلاط سرد ب) اختلاط گرم (با فعالسازی احتراق)

Fig. 13. Methane molar fraction on the axis for different bluff body locations and for air velocity of 3.75 m/s a) cold mixing b) hot mixing (reaction is activated)



شکل ۱۴. خطوط جریان به‌ازای موقعیت‌های مکانی مختلف مانع جریان در سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه الف) مانع جریان در فاصله ۰ میلی‌متری از کانال هوا ب) مانع جریان در فاصله ۵ میلی‌متری از کانال هوا ج) مانع جریان در فاصله ۱۰ میلی‌متری از کانال هوا

Fig. 14. Streamlines for different bluff body locations and for air velocity of 3.75 m/s a) bluff body is located at a distance of 0mm from the air inlet b) bluff body is located at a distance of 5mm from the air inlet c) bluff body is located at a distance of 10mm from the air inlet

هوا بهتر صورت پذیرفته است.

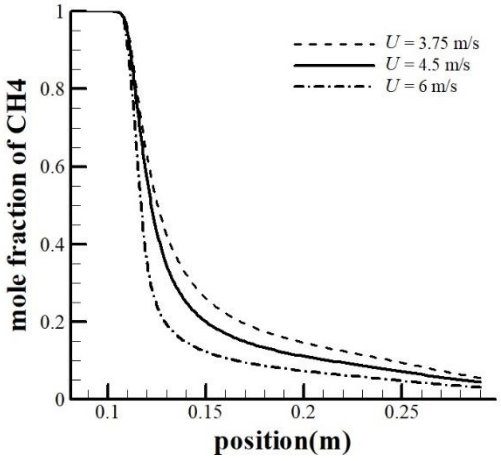
تأثیر موقعیت مانع‌جریان بر خطوط جریان در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود وقتی مانع‌جریان در فاصله ۵ میلی‌متری از کانال هوا (یعنی H برابر با ۵ میلی‌متر) قرار دارد، ناحیه چرخشی درونی قوی‌تری ایجاد شده است که اختلاط اختلاط سریع‌تر سوخت و هوا را در پی داشته است.

۴- ۳- تأثیر سرعت هوای ورودی بر میدان جریان و نرخ اختلاط سوخت و هوا

در این بخش، با ثابت فرض نمودن ابعاد مانع‌جریان دیسکی‌شکل (به میزان ضخامت ۵ میلی‌متر و شعاع ۶ میلی‌متر) و همچنین با ثابت فرض نمودن موقعیت مکانی آن (به فاصله ۵ میلی‌متر از کانال هوا)، به بررسی تأثیر سرعت هوای ورودی بر میدان جریان و اختلاط سوخت و هوا پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است همچون بخش‌های پیشین، سرعت جت سوخت ثابت و برابر با ۱۰ متربرثانیه فرض شده است.

۴- ۳- ۱- تأثیر سرعت هوای ورودی: اختلاط سرد

تغییرات کسر مولی متان روی محور تقارن به‌ازای سرعت‌های متفاوت در شکل ۱۵ به نمایش درآمده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، سرعت‌های بالاتر موجب نفوذ بیشتر هوا از اطراف به هسته مرکزی و درنتیجه کاهش سریعتر کسر مولی متان در امتداد محور تقارن شده است.



شکل ۱۵. نمودار کسر مولی متان روی محور تقارن در شرایط اختلاط سرد به‌ازای سرعت‌های مختلف هوای ورودی

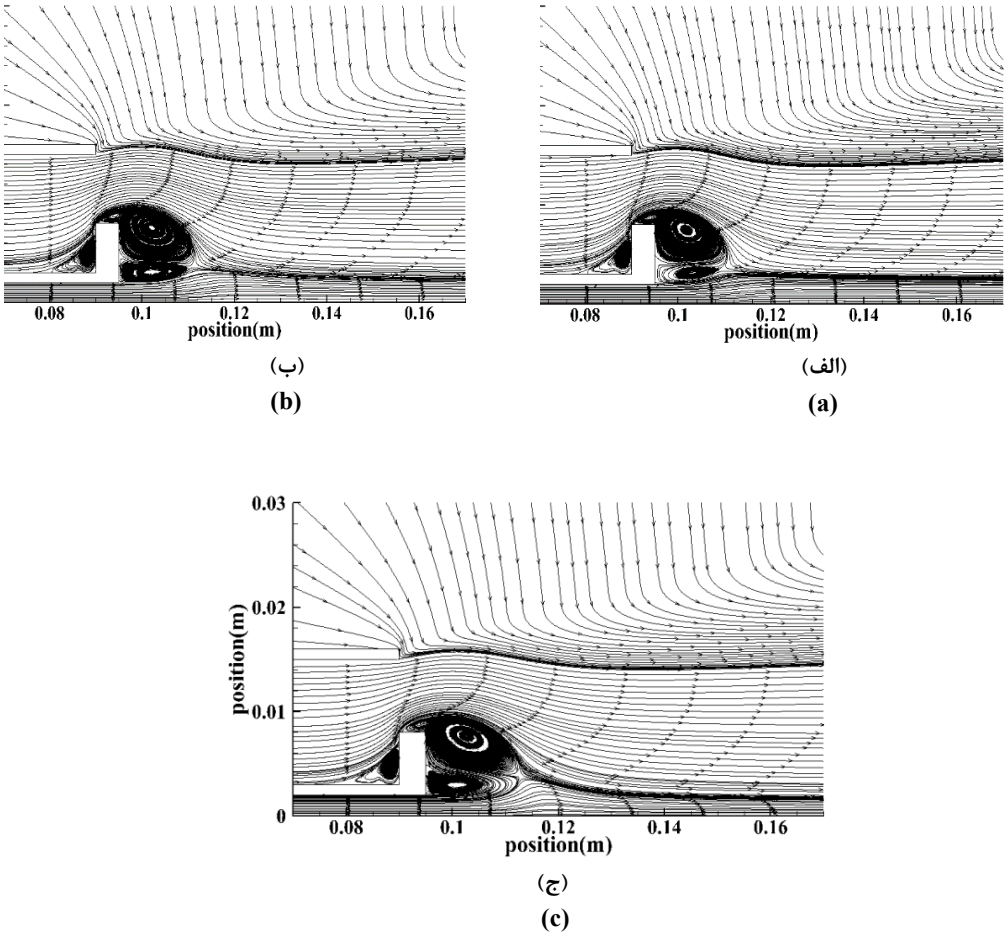
Fig. 15. Methane molar fraction on the axis under cold mixing conditions for different air velocities

عکس روند مشاهده شده برای کسر مولی متان روی محور تقارن، برای کسر مولی اکسیژن صادق است و برای جلوگیری از تکرار، از نمایش آن خودداری شده است.

خطوط جریان در نواحی نزدیک مانع‌جریان به‌ازای سرعت‌های مختلف هوا در شکل ۱۶ ترسیم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در سرعت‌های بالاتر، گردابه‌های بزرگ‌تر و قوی‌تری ایجاد شده و باعث شده است هوا و سوخت اختلاط بهتری داشته باشند. به عبارتی، هوا سوخت را بهتر احاطه نموده و از فرار سوخت بدون اختلاط با هوا ممانعت نموده است.

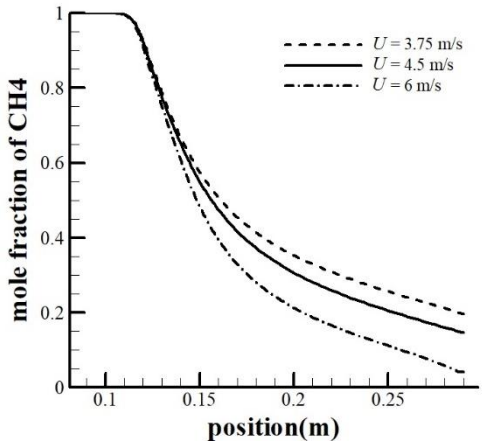
۴- ۳- ۲- تأثیر سرعت هوای ورودی: با فعالسازی واکنش

در بخش قبل مشاهده شد که سرعتهای بالاتر هوا، و جریان‌های



شکل ۱۶. خطوط جریان در شرایط اختلاط سرد به‌ازای سرعت‌های متفاوت هوای ورودی الف) سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه ب) سرعت هوای ۴/۵ متربرثانیه ج) سرعت هوای ۶ متربرثانیه

Fig. 16. Streamlines for different air velocities under cold mixing conditions. a) for air velocity of 3.75m/s. b) for air velocity of 4.5m/s. c) for air velocity of 6 m/s



شکل ۱۷. نمودار کسر مولی متان روی محور تقارن به‌ازای سرعت‌های مختلف هوا در شرایط اختلاط گرم (با فعالسازی واکنش)

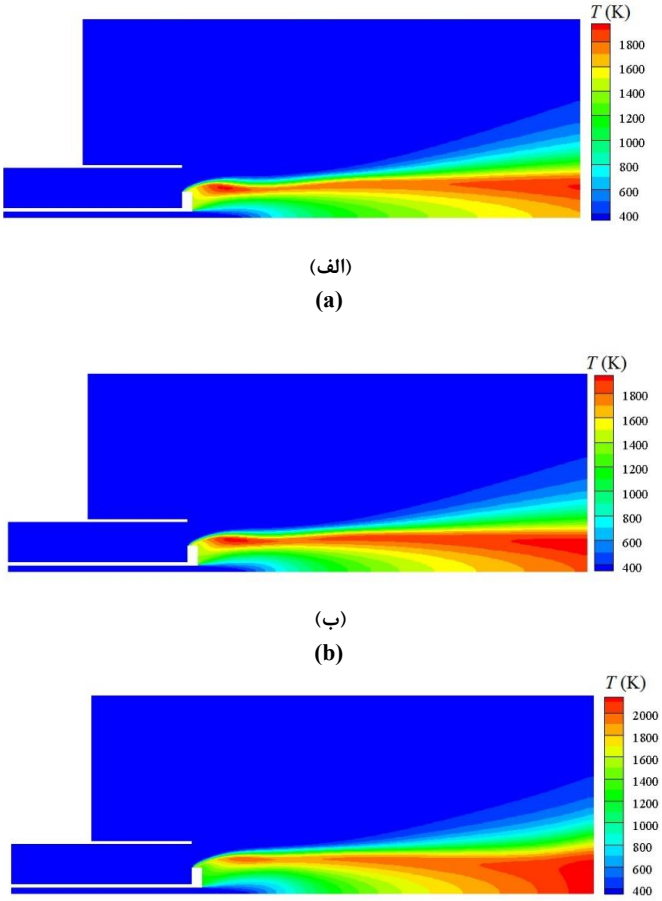
Fig. 17. Methane molar fraction on the axis under hot mixing conditions (considering reaction) for different air velocities

گرداب‌های قوی‌تر ناشی از آن در پایین‌دست مانع‌جریان، منجربه احاطه بهتر سوخت توسط هوا و اختلاط بهتر سوخت و هوا در شرایط اختلاط سرد شده است. در این بخش، واکنش میان سوخت و هوا فعال شده و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد. تغییرات کسر مولی متان روی محور تقارن به‌ازای سرعت‌های متفاوت در شکل ۱۷ به نمایش درآمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افت سریعتر کسر مولی متان به‌ازای سرعت‌های بالاتر هوا مشهود است. این اتفاق در تطابق با نتایج اختلاط سرد می‌باشد.

همچنین خطوط همتراز دما به‌ازای سرعت‌های مختلف هوای ورودی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سرعت هوای بیشتر موجب شده است که شعله کوتاه‌تر شود. از نقطه‌نظر معادلات حاکم، همانطور که در بخش ۱-۲ ذکر شد، نرخ احتراق در مدل مورد استفاده (اتلاف گردابه‌ای) توسط اختلاط آشفتگی محدود و کنترل می‌شود. به‌عبارتی، اختلاط بهتر منجربه افزایش نرخ احتراق و بنابراین کوتاه‌شدن شعله شده است.

۵- جمع‌بندی

در مطالعه حاضر، با هدف بررسی تأثیر ابعاد و محل قرارگیری مانع دیسکی‌شکل در سرمشعل، به شبیه‌سازی عددی یک شعله نفوذی گازی پرداخته شده است. با انتخاب یک مطالعه موردی و به‌ازای سرعت جت سوخت برابر با ۱۰ متربرثانیه، شبیه‌سازی به‌ازای ضخامت‌های مختلف مانع



شکل ۱۸. خطوط همتراز دما به‌ازای سرعت‌های مختلف هوای ورودی. الف)سرعت هوای ۳/۷۵ متربرثانیه. ب) سرعت هوای ۴/۵ متربرثانیه. ج) سرعت هوای ۶ متربرثانیه

Fig. 18. Contours of temperature for different air inlet velocities. a) for air velocity of 3.75 m/s. b) for air velocity of 4.5 m/s. c) for air velocity of 6m/s

(۴، ۵ و ۶ میلی‌متر)، شعاع‌های مختلف مانع (۴، ۵ و ۶ میلی‌متر)، فواصل مختلف مانع از لبه ورودی هوا (۰، ۵ و ۱۰ میلی‌متر) و سرعت‌های متفاوت جت هوا (۷۵/۳ ، ۵/۴ و ۶ متربرثانیه) صورت پذیرفته است. با توجه به ورود سوخت از مرکز و هوا از اطراف، میزان کاهش کسر مولی متان (و یا افزایش کسر مولی اکسیژن) روی محور تقارن، به عنوان معیاری از کیفیت اختلاط سوخت و هوا درنظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که شعاع مانع در مقایسه با ضخامت آن، تأثیر محسوس‌تری بر گردابه‌های هدفمند پایین‌دست مانع و اختلاط سوخت و هوا و سایر ویژگی‌های شعله داشته است. نتایج نشان داد از میان ابعاد متفاوت مانع جریان، ضخامت ۵ میلی‌متر و شعاع ۶ میلی‌متر،

اختلاط سوخت و هوای بهتری را منجر شده است. همچنین مشاهده شد که موقعیت مکانی مانع نیز عاملی مؤثر در اختلاط سوخت و هوا بوده و از میان موارد مورد بررسی، فاصله مکانی ۵ میلی‌متر مانع از خروجی کانال هوا، بیشترین اختلاط را موجب شده است. با تغییر سرعت هوای ورودی (به‌ازای سرعت ثابت جت سوخت) نتایج نشان داد که در سرعت‌های بالاتر، نرخ کسر مولی متان روی محور تقارن کاهش پیدا کرده است، متان سریع‌تر مصرف شده و طول شعله کاهش یافته است. همچنین با توجه به خطوط جریان رسم شده در نواحی مانع جریان مشاهده شد که گردابه‌های تولید شده در سرعت‌های بالاتر، قوی‌تر و طول شعله کوتاه‌تر است. به عبارتی سرعت‌های هوای بیشتر، سبب احاطه شدن بهتر سوخت و جلوگیری از فرار آن از منطقه واکنشی شده است.

۶- فهرست علائم

A, B ثوابت مدل اتلاف گردابه‌ای

D ضریب نفوذ جرمی

h آنتالپی ($\mathbf{kJ.kg^{-1}}$)

I شدت تابش ($\mathrm{Wm^{-2}}$)

K ضریب هدایت حرارتی ($\mathbf{W.m^{-1}.K^{-1}}$)

k انرژی جنبشی آشفتگی ($\mathbf{m^2s^{-2}}$)

M جرم مولی ($\mathbf{kg.kmol^{-1}}$)

n ضریب شکست

P فشار (Pa)

Pr عدد پرانتل

R نرخ خالص تولید یا مصرف($\mathrm{kmol.m^{-3}.s^{-1}}$)

r بردار مکان

s بردار جهت

Sc_t عدد اشمیت آشفتگی

T دمای محلی(K)

u سرعت متوسط جریان ($\mathbf{m.s^{-1}}$)

Y کسر جرمی

علایم یونانی

α ضریب جذب تابشی

ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی ($\mathbf{m^2s^{-3}}$)

μ گرانروی دینامیکی ($\mathbf{kg.m^{-1}.s^{-1}}$)

ν' ضریب استوکیومتریک در سمت واکنش‌دهنده‌ها

ν'' ضریب استوکیومتریک در سمت فرآورده‌ها

ρ چگالی ($\mathbf{kg.m^{-3}}$)

σ ثابت استفان بولتزمان ($\mathbf{W.m^{-2}.K^{-4}}$)

σ_s ۱- ضریب پخش ($\mathbf{m^{-1}}$)

Ω' زاویه فضایی

ω نرخ مخصوص اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی ($\mathbf{s^{-1}}$)

بالانویس‌ها

$\circ$ نشانگر آنتالپی تشکیل

زیرنویس‌ها

k گونه شیمیایی

p فرآورده

R واکنش‌دهنده

t آشفته

منابع

[1] C.K. Law, Multicomponent Droplet Combustion, Combustion Physics, New York: Cambridge University Press (2006).

[2] J. Warnatz, U. Maas, R.W. Dibble, Combustion, Heidelberg: Springer (2006).

[3] J. Conti, et al. International energy Outlook 2016 with projections to 2040, Washington DC, USA (2016).

[4] K. M. Kundu , D. Banerjee, D. Bhaduri, On flame stabilization by bluff- bodies, Journal of Engineering for Power, 102 (1980) 209-214.

[5] H. K. Ma, J. S. Harn, The jet mixing effect on reaction flow in a bluff-body burner, International journal of heat and mass transfer, 37(18) (1994) 2957-2967.

[6] R.W. Schefer, M. Namazian, J. Kelly, M. Perrin, Effect

of confinement on bluff-body burner recirculation zone characteristics and flame stability, Combustion science and technology, 120(1-6) (1996) 185-211.

[7] I. Esquiva-Dano, H. T. Nguyen, D. Escudie, Influence of a bluff-body's shape on the stabilization regime of non-premixed flames, Combustion and Flame, 127(4) (2001) 2167-2180.

[8] L.K. Sze, C. S. Cheung, C.W. Leung, Temperature distribution and heat transfer characteristics of an inverse diffusion flame with circumferentially arranged fuel ports, International Journal of heat and mass transfer, 47(14-16) (2004) 3119-3129.

[9] A. Sobiesiak, J.C. Wenzell, Characteristics and Structure of Inverse Flames of Natural Gas, Proceedings of the Combustion Institute, 30(1) (2005) 743-749.

[10] P. Hariharan, C. Periasamy, S.R. Gollahalli, Effect of Elliptic Burner Geometry and Air Equivalence Ratio on the nitric Oxide Emissions from Turbulent Hydrogen Flames, International Journal of Hydrogen Energy, 32 (8) (2007) 1095-1102.

[11] P. Kumar, D. Mishra, Effects of bluff-body shape on LPG–H 2 jet diffusion flame, International Journal of Hydrogen Energy, 33(10) (2008) 2578-2585.

[12] H. S. Zhen, C. W. Leung, C. S. Cheung, Thermal and Emission Characteristics of A Turbulent Swirling Inverse Diffusion Flame, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(5-6) (2010) 902-909.

[13] D. Ashoke, S. Acharya, Parametric study of upstream flame propagation in hydrogen-enriched premixed combustion: Effects of swirl, geometry and premixedness, International journal of hydrogen energy, 37(19) (2012) 14649-14668.

[14] S.A. Hashemi, N. Hajialigol, K. Mazaheri, and A. Fattahi, Investigation of the effect of the flame holder geometry on the flame structure in non-premixed hydrogen-hydrocarbon composite fuel combustion, Combustion, Explosion, and Shock Waves, 50(1) (2014) 32-41.

[15] M.M. Noor, A. P. Wandel, T. Yusaf., Analysis of recirculation zone and ignition position of non-premixed bluff-body for biogas MILD combustion, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 8(1) (2013) 1176-1186.

[16] Z. Wang, et al., LES investigation of swirl intensity effect on unconfined turbulent swirling premixed flame, Chinese science bulletin 59 (33) (2014) 4550-4558.

[17] T. Yiheng, et al., Experimental Investigation on the Influences of Bluff-Body's Position on Diffusion Flame Structures, ASME Power Conference (2017) POWER-ICOPE2017-3090.

[18] T. Yiheng, et al., Effects of the position of a bluff-body on the diffusion flames: A combined experimental and numerical study, Applied Thermal Engineering 131 (2018) 507-521.

[19] S. F. Mousavi Kolousforoushi , J. Mahmoudimehr, Influence of Burner Head Design on Its Thermal and Environmental Characteristics, AUT J. Mech. Eng., 2(1) (2018) 27-38.

[20] N. Peters, Turbulent Combustion, Cambridge University Press, Cambridge (2000).

[21] T. Poinsot, D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion, Edwards Press (2005).

[22] A.Bahari, K. Atashkari, J. Mahmoudimehr, Multi-objective optimization of a municipal solid waste gasifier, Biomass Conversion and Biorefinery, (2020) 1-16.

[23] ANSYS Fluent User's Guide, ANSYS, Inc. (2016).

[24] A. Karl, J. Chi Hung Fung, An improved SST k− ω model for pollutant dispersion simulations within an isothermal boundary layer, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 179 (2018) 369-384.

[25] H. Sheikhani, H. Ajam, M. Ghazikhani, A review of flame radiation research from the perspective of factors affecting the flame radiation, measurement and modeling, The European Physical Journal Plus, 135(4) (2020) 343.

[26] F. Kulacki, Handbook of Thermal Science and Engineering, Springer, (2018).

[27] D. Poitou, M. El-Hafi, B. Cuenot, Analysis of Radiation

[28] M. Rasouli, J. Mahmoudimehr, Minimization of the Emission of Pollutants along with Maximization of Radiation from An Air-Staged Natural Gas Flame, Modares Mechanical Engineering 16 (7) (2016) 207-218 (in Persian).

Modeling for Turbulent Combustion: Development of a Methodology to Couple Turbulent Combustion and Radiative Heat Transfer in LES, Journal of Heat Transfer, American Society of Mechanical Engineers, 133(6) (2011) 062701.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Asefi, J. Mahmoudimehr, Numerical Investigation of the Influence of Burner's Bluff Body on Air-Fuel Mixing and Reaction, Amirkabir J. Mech Eng., 53(9) (2021) 4981-4998.

DOI: 10.22060/mej.2021.18906.6915