Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1395، دوره 16، شماره 13، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص 9-12

مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی تهویه‌مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی
بیرجند، دانشگاه بیرجند، 6 و 7 مهر 1395
مهندسی مکانیک مدرس
mme.modares.ac.ir

بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر افزایش پایداری شعله در مشعل‌های لایه‌ای دارای احتراق پیش آمیخته کم‌سوخت به روش شبکه بولتزمن

الهه نوروزی جاجرم[1]، جواد ابوالفضلی اصفهانی[2*]، احمد مددی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
2- استاد گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
3- مربی گروه مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
* مشهد، صندوق پستی 9177948974 abolfazl@um.ac.ir

چکیده

فرآیند احتراق در سیستم بویلر، یک فرآیند با چند ورودی و چند خروجی، متغیر با زمان و به شدت غیرخطی است. بنابراین تنظیم پارامترهای کنترل پذیر اصلی آن با استفاده از روش های کلاسیک مشکل است. از این‌رو توسعه فرآیندهای احتراقی با مصرف انرژی و تولید آلاینده‌های کمتر، به یکی از زمینه‌های مورد علاقه پژوهشگران تبدیل شده است. یکی از روش‌های کاربردی برای این منظور، استفاده از احتراق‌های پیش‌آمیخته کم سوخت در مشعل انواع بویلرها می‌باشد. در این پژوهش تاثیر تزریق هوا روی یک شعله پیش‌آمیخته ضعیف در یک مشعل لایه‌ای در سرعت و نسبت هم‌ارزی‌های متغیر مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت تک جریانی، با افزایش نسبت هم‌ارزی تا نزدیکی نسبت استوکیومتری افزایش پایداری در ساختار شعله مشاهده می‌شود. در همین حالت با افزایش سرعت مخلوط تزریقی از سرعت 0.5 تا 1 متر بر ثانیه با کاهش میزان زاویه مایل، روند بهبود در پایداری شعله برخاسته را خواهیم داشت، در حالی‌که با افزایش سرعت برای سرعت‌های بالاتر از 1 متر بر ثانیه، شاهد کاهش این پایداری هستیم. در حالت چند جریانی با تزریق هوا از مجرای داخلی، تاثیری در ساختار شعله مشاهده نمی‌شود. با تزریق هوا از طریق مجرای خارجی شاهد دگرگونی در پیکربندی شعله به یک شعله شبه مخروطی پایدار هستیم که در این حالت هوای تزریق شده به مجرای خارجی نقش عایق در مقابل جریان سرد محیطی را دارد. در نتیجه تزریق خارجی هوا تاثیر مثبتی در افزایش پایداری شعله خواهد داشت.

کلید واژگان: بویلر، احتراق پیش آمیخته، شبکه بولتزمن، احتراق کم سوخت

Investigation of the Effective Parameters on the flame sustainability in stratified burner with premixed combustion by Lattice-Boltzmann method

Elahe Norozi Jajarm[1], Javad Abolfazli Esfehani[2*], Ahmad Madadi[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Sanati Shahroud, Shahroud, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi of Mashhad University, Mashhad, Iran
* P.O.B. 9177948974, Mashhad, Iran, abolfazl@um.ac.ir

ABSTRACT

The combustion process in a boiler system is a process with multiple inputs and outputs, time dependent and highly non-linear. So, it's difficult to set the main parameters using the classic method. The combustion process development with less energy consumption and less pollution is one of the fields of research interest. One method, with this purpose, is using lean premixed combustion in burner of boilers. In this article, the impact of the air injection on the lean premixed flame in stratified burner is studied. Velocity and equivalence ratio are set as variables. In a single flow mode, with increasing equivalence ratio up to stoichiometry ratio, the flame structure sustainability increases. In this mode, by increasing mixture injection velocity from 0.5 to 1 m/s, and decrease in oblique angle, the flow-off flame sustainability improves. By further increase in velocity, beyond 1 m/s, the sustainability comes down. In multiple-flow mode, by air injection from inner duct, no variation in flame structure is noticed. By air injection from outer duct, the flam structure deforms to sustainable conical flame, as in this mode the injected air in outer duct plays insulation role against cool environmental flow. Hence, the outer air injection has a positive effect on flame sustainability.

Keywords: Boiler, Premixed Combustion, Boltzmann Method, Lean Combustion

1- مقدمه

امروزه با توجه به افزایش ارزش انرژی، یکی از دغدغه‌های جدی صنایع، افزایش راندمان بویلرها به کمک بهینه‌سازی بازده احتراق است. بهینه‌سازی کارکرد سیستم احتراق باعث افزایش بازده احتراق و کاهش انتشار گازهای نامطلوب می‌شود. فرآیند احتراق در سیستم بویلر، یک فرآیند با چند ورودی و چند خروجی، متغیر با زمان و به‌شدت غیرخطی است. بنابراین تنظیم پارامترهای کنترل‌پذیر اصلی آن با استفاده از روش‌های کلاسیک مشکل است. از این‌رو توسعه فرآیندهای احتراقی با مصرف انرژی و تولید آلاینده‌های کمتر، به یکی از زمینه‌های مورد علاقه پژوهشگران تبدیل شده است. یکی از روش‌های کاربردی برای این منظور، استفاده از احتراق‌های پیش‌آمیخته کم سوخت در مشعل انواع بویلرها می‌باشد. در احتراق پیش‌آمیخته کم سوخت، علاوه‌بر کاهش در مصرف انرژی، به‌دلیل دمای پایین‌تر محصولات احتراقی، گازهای آلاینده کمتری تولید شده و مانع از افزایش دمای کره زمین می‌شوند. با وجود فواید بسیار زیاد این روش احتراقی، به‌دلیل گرمای آزاد شده پایین در فرآیند احتراق، شعله دچار نوسان و ناپایداری شده و نهایتا خاموش می‌گردد. لذا یکی از چالش‌های پیش‌رو برای کاربردی شده این

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
E.Norozi Jajarm, Ja.Abolfazli Esfehani, A.Madadi, Investigation of the Effective Parameters on the flame sustainability in stratified burner with premixed combustion by Lattice-Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 9-12, 2016 (in Persian فارسی)

www.SID.ir

Archive of SID

روش احتراقی در بویلرها، افزایش پایداری شعله در کنار حفظ درجه حرارت بالای شعله و قدرت خروجی مشعل می‌باشد.

تاکنون محققان زیادی افزایش پایداری شعله در احتراق غیر پیش‌آمیخته و پیش آمیخته را مورد بررسی قرار داده‌اند. در سال 2013 دیوید و همکاران [1] به مقایسه رفتار جدایش شعله در شعله‌های غیر پیش‌آمیخته چرخشی پرداختند. آن‌ها با مشاهده عکس‌های گرفته شده از شعله در فرکانس 5 kHz دریافتند که شعله‌های غیرپیش‌آمیخته به‌طور تناوبی کنده می‌شوند. در سال 2007 پاوبل و همکاران [2] به مطالعه نمودار پایداری شعله برای احتراق غیر پیش‌آمیخته oxy با گازهای باقیمانده با ارزش حرارتی پایین پرداختند. آن‌ها دریافتند که استفاده از شعله متان- اکسیژن خالص به گازهای باقیمانده این اجازه را می‌دهد با کالری بسیار پایین در طیف وسیعی از شرایط عملکردی بسوزند. در سال 2004 کوارک و همکاران [3] به بررسی تاثیر شدت چرخش بر روی جریان و احتراق یک شعله تخت آشفته غیر پیش‌آمیخته پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با توجه به عدد چرخش، الگوهای جریان بسیار متفاوتی ظاهر می‌شوند که شکل و ساختار شعله را در احتراق کنترل می‌کنند. در سال 2007 سیانی و همکاران [4] به بررسی آزمایشگاهی روی پایداری شعله‌های دیفیوژن و خطی در یک مشعل با جت مخالف پرداختند. ایشان نشان داند که در منطقه ناپایداری، امکان تغییر شکل شعله با افزایش یا کاهش نرخ کشش وجود دارد. در سال 2013 هاشمی و همکاران [5] به بررسی تاثیر هندسه نگه‌دارنده شعله روی ساختار شعله در احتراق غیر پیش-آمیخته پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که افزایش شعاع نگه‌دارنده شعله، طول شعله را کاهش می‌دهد.

در زمینه پایداری در احتراق پیش آمیخته نیز تحقیقات متعددی صورت گرفته است. در سال 2012 آچاریا و همکاران [6] به بررسی تاثیر چرخش روی تحریک متوازن و سینماتیک شعله‌های پیش‌آمیخته پرداختند. در سال 2013 دیوید و همکاران [1] به مقایسه رفتار جدایش شعله در شعله‌های پیش‌آمیخته پایدار چرخشی پرداختند. جین و همکاران [7] در سال 998 به مطالعه پایداری شعله‌های پیش‌آمیخته توسط جت مخالف پرداختند. ایشان برای جدایش شعله ناشی از سوخت‌ها، معادلات نمایی را ارائه کردند. در سال 2010 هیگر و همکاران [8] با استفاده از دستگاه PIV به تحلیل برگشت شعله در شعله‌های چرخشی پیش‌آمیخته ضعیف پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش استوکیومتری، عدد چرخش و یا کاهش عدد رینولدز، برگشت شعله به جریان القا می‌شود. در سال 2009 چو و همکاران [9] با بررسی روی بهبود پایداری شعله‌ها و کاهش NO_x در احتراق پیش‌آمیخته ضعیف با اضافه کردن هیدروژن به نتایج مهمی دست یافتند. آن‌ها نشان دادند که در احتراق پیش‌آمیخته ضعیف به‌علت این‌که احتراق در نزدیکی حد پایین اشتعال‌پذیری اتفاق می‌افتد، شعله‌های تشکیل شده ناپایدارند.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در زمینه پایداری شعله در احتراق پیش‌آمیخته، در این مقاله به بررسی پایداری شعله در احتراق پیش‌آمیخته کم سوخت پروپان با استفاده از روش شبکه بولتزمن پرداخته شده است. برای این منظور با استفاده از روش عددی بولتزمن، با در نظر گرفتن جریان متقاطع هوا در مشعل لایه‌ای، پارامترهای تاثیرگذار بر پایداری شعله جهت کاربرد در مشعل بویلرها مورد بررسی قرار گرفته است.

2- روش حل مسئله

از گذشته انواع مدل‌های ریاضی نظیر معادلات ناویراستوکس یا معادله بولتزمن به‌منظور توضیح رفتار جریان سیال مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. با این وجود، حل تحلیلی این معادلات بسیار دشوار می‌باشد. در سال‌های اخیر روش‌های حل عددی، به‌عنوان روش‌هایی قدرتمند در دینامیک سیالات مورد توجه قرار گرفته است. در میان این روش‌ها روش شبکه بولتزمن با دارا بودن قابلیت تحلیل مسائل در مقیاس ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک تحولی نو در این عرصه به‌وجود آورده است. در این روش اثر کلی حضور ملکول‌ها در توابع توزیع ذرات در نظر گرفته می‌شود. روش شبکه بولتزمن از دو مرحله انتشار و برخورد تشکیل شده است. در شبیه‌سازی جریان‌های تک-فاز و هم‌دما، پایداری عددی، دقت و هزینه محاسباتی روش شبکه بولتزمن قابل مقایسه با روش‌هایی نظیر روش حجم محدود می‌باشد. از جمله نقاط قوت شبکه بولتزمن می‌توان به توانایی آن در شبیه‌سازی جریان‌هایی با مرزهای هندسی پیچیده اشاره کرد.

برای بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر پایداری شعله در احتراق پیش‌آمیخته کم سوخت پروپان و هوا از مشعل لایه ای که در "شکل 1" نشان داده شده است، استفاده می شود. مشخصات هندسی مشعل مدل‌سازی شده در جداول 1 آورده شده است. به دلیل تقارن محوری مشعل مورد مطالعه، در شبیه‌سازی عددی به روش شبکه بولتزمن، از نیمه بالایی این هندسه برای بررسی‌های پیش‌رو استفاده شده است.

3- معادلات حاکم

روش شبکه بولتزمن قابلیت حل معادله بولتزمن را دارا می‌باشد. معادله بولتزمن را در شکل کلی می‌توان به صورت زیر بیان نمود [10]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{F}{m}\frac{\partial f}{\partial v} = \emptyset(f_1, f_2) \qquad (1)$$

در رابطه فوق، $f(x,v,t)$ بیانگر تابع توزیع ذره‌ای با سرعت v در موقعیت x و زمان t می‌باشد. همچنین F نمایانگر نیروی خارجی و m جرم ذره می‌باشد.

سمت راست معادله (1) جمله برخورد نامیده شده که تغییر در تابع توزیع در نتیجه برخورد میان دو ذره را نشان می‌دهد و به‌صورت زیر ارائه شده است [10]:

$$\emptyset(f_1, f_2) = \int_{R^3}\int_S |V.n|(f_{1'}f_{2'} - f_1 f_2)dn \qquad (2)$$

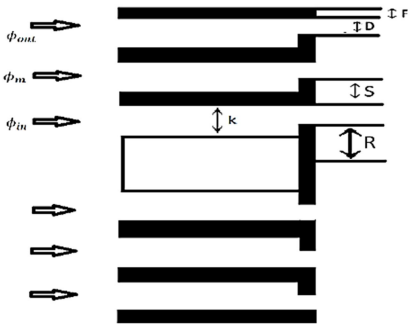

Fig. 1 Geometry of stratified burner modeled

شکل 1 هندسه مشعل لایه‌ای مدل‌سازی شده

جدول 1 مشخصات هندسی مشعل لایه‌ای مدل‌سازی شده

Table 1 Geometry characteristics of stratified burner modeled

جنس	R	S	D	K		F
فولاد	نصف طول مانع	فاصله بین هر مجرا	خروجی مشعل	ورودی مشعل	طول مشعل	اندازه دیوار بیرونی
واحد	mm	Mm	Mm	Mm	Mm	Mm
اندازه	5	4	3	5	20	1

www.SID.ir

Archive of SID

در رابطه (2)، دو ذره قبل از برخورد با اعداد 1 و 2 و ذرات پس از برخورد با 1' و 2' مشخص گردیده‌اند و v سرعت نسبی ذره 2 (v2) نسبت به ذره 1 (v1) می‌باشد. همچنین انتگرال روی فضای سه‌بعدی R3 و سطح خارجی نیم‌کره S انجام می‌پذیرد.

با توجه به پیچیده بودن جمله برخورد، چند مدل به‌منظور تقریب زدن این جمله پیشنهاد شده است در این میان یکی از پرکاربردترین روابط، مدل پیشنهادی توسط بهاتناگار- گروس- کروک می‌باشد که جزئیات آن در مرجع [10] آورده شده است. همچنین سایر معادلات انتقال حرارت و کسر جرمی در روش شبکه بولتزمن و جزئیات حل آن‌ها به‌شکل تفصیلی در مراجع [11-13] آورده شده است.

4- نتایج

در این مقاله به بررسی پایداری شعله در احتراق پیش‌آمیخته کم سوخت پروپان با استفاده از روش شبکه بولتزمن پرداخته شده است. برای این منظور با استفاده از روش عددی بولتزمن، با در نظر گرفتن جریان متقاطع هوا در مشعل لایه‌ای، پارامترهای تاثیرگذار بر پایداری شعله مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر بدست آمد.

"شکل 2" سه ساختار متفاوت را برای شعله نشان می‌دهد. در حالت تک جریان، مخلوط پیش‌آمیخته از مجرای میانی وارد مشعل می‌شود. با کاهش نسبت هم‌ارزی، در سرعت 1 متر بر ثانیه، پیکربندی شعله از یک شعله مخروطی (در نسبت هم‌ارزی0.95)، یک شعله برخاسته (در نسبت هم-ارزی0.85)، به یک شعله نزدیک به کنده شدن (در نسبت هم‌ارزی 0.6)، دگرگون می‌شود و پایداری شعله با کاهش نسبت هم‌ارزی، کاهش می‌یابد. شعله در نسبت هم‌ارزی 0.95، پایدار و با طول شعله کوتاه است، در این حالت به‌علت نزدیکی نسبت هم‌ارزی به نقطه استوکیومتری، سرعت سوخت افزایش می‌یابد. سمت بیرونی شعله در $\emptyset = 0.85$ به دلیل سرعت سوخت پایین‌تر، کمتر روی مشعل لنگر انداخته است همین باعث شده است که شکلی برخاسته داشته باشد. با کاهش نسبت هم‌ارزی تا 0.6 شعله نزدیک به کنده شدن می‌رسد، و در این حالت در اثر گرمای رها شده به‌علت میزان نامناسب سوخت، شعله ضعیف و کم‌نور می‌شود.

"شکل 3"، تاثیر تغییرات سرعت بر پایداری شعله در نسبت هم‌ارزی 0.85 را نشان می‌دهد. با کاهش سرعت سوخت، به نصف سرعت سوخت در نقطه استوکیومتری، ریشه شعله برخاسته بلندتر می‌شود. به‌علت تغییرات عمده در منطقه واکنش، تعامل بین شعله و جریان تاثیر زیادی بر هندسه شعله می‌گذارد، در نتیجه یک زاویه مایل مخصوصا برای شعله برخاسته به-وجود می‌آید. این زاویه مایل، بین صفحه عمودی و راس شعله را شامل می-شود. زاویه مایل در سرعت 1 متر بر ثانیه، به کمترین مقدارخود، 45.5 درجه می‌رسد. با توجه به محدوده سرعت در این حالت با افزایش سرعت از حد پایینی آن تا سرعت 1 متر بر ثانیه شاهد پایداری شعله برخاسته خواهیم بود، اما با افزایش سرعت، برای سرعت‌های بالاتر از 1 متر بر ثانیه با افزایش زاویه مایل، کاهش پایداری شعله را خواهیم داشت.

در حالت چند جریان دو موقعیت متفاوت را برای تزریق هوا بررسی می‌کنیم، تزریق داخلی هوا که در این حالت محدوده سرعت 2- 0.1 متر بر ثانیه است و در تزریق خارجی هوا محدوده سرعت 2.5- 0.1 متر بر ثانیه است. "شکل 4"، پیکربندی شعله را برای چند جریان در مقایسه با حالت تک‌جریان نشان می‌دهد. در این شکل مخلوط سوخت و هوا با نسبت هم‌ارزی 0.85 از مجرای میانی و هوا از مجرای خارجی وارد مشعل می‌شوند. می‌بینیم

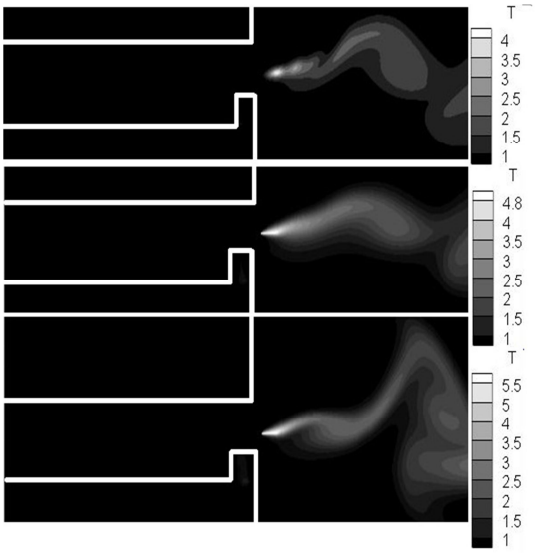

Fig. 2 Lean flames in a single-flow mode with configurations near blowout flame, lift-off flame and cone flame

شکل 2 پیکربندی شعله‌های ضعیف در حالت تک جریان با سرعت $U_m = 1$ (m/s) : الف: شعله نزدیک به کنده‌شدن ($\emptyset_m = 0.6$)، ب: شعله برخاسته ($\emptyset_m = 0.85$)، ج : شعله مخروطی ($\emptyset_m = 0.95$)

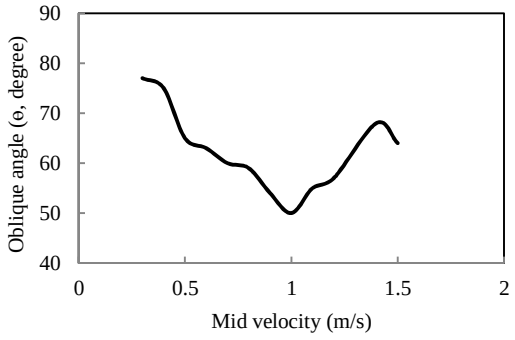

Fig. 3 Variation of oblique angle as a function of velocity of the mixture

شکل 3 تغییرات زاویه شعله نسبت به تغییرات سرعت مخلوط

زمانی که هوا با سرعتی بزرگ‌تر از یک سرعت حدی وارد مشعل می‌شود، یک شعله شبه‌مخروطی با پایداری بیشتر ظاهر می‌شود، راس شعله به سمت پایین خم می‌شود و شکلی شبیه به شعله مخروطی نمایان می‌شود. در این حالت یک جریان گردابه‌ای کوچک بین مجرای میانی و مجرای خارجی تشکیل می‌شود که منطقه گردابی متقاطع نامیده می‌شود که یک عامل کلیدی برای تغییر از یک شعله برخاسته به یک شعله شبه‌مخروطی می‌باشد. زمانی که هوا از مجرای داخلی وارد مشعل می‌شود، در این حالت اثر قابل درکی روی شعله مشاهده نمی‌شود و تزریق هوا در این حالت تاثیری در پایداری شعله ندارد.

برای بررسی دقیق‌تر تاثیر تزریق هوا در مجرای خارجی، نسبت هم‌ارزی را روی 0.85 ثابت کرده‌ایم، و سرعت مخلوط سوخت و هوا را در محدوده 1.4-0.1 متر بر ثانیه تنظیم کرده‌ایم، با تغییرات سرعت هوا درجریان بیرونی، سرعت U^*O[1] را اندازه گرفته‌ایم نتایج حاصل را در "شکل 5" شان داده‌ایم، زمانی‌که سرعت میانی از (m/s) 0.5 کمتر می‌شود، نسبت سرعت باید بیشتر از مقدار واحد افزایش یابد تا شعله از حالت برخاسته به حالتی پایدار

[1] U_o/U_m

www.SID.ir

Archive of SID

برسد، و همین‌طور با روند کاهش سرعت میانی، افزایش بیشتری در نسبت سرعت باید حاصل شود. محدوده بالای نمودار منطقه شعله‌های شبه‌مخروطی و پایین نمودار محدوده شعله‌های برخاسته را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تغییرات پیکربندی شعله را از یک شعله برخاسته به یک شعله شبه مخروطی است. می‌توان به این نتیجه رسید که جریان هوا در مجرای خارجی مشعل نقش یک عایق را در برابر جریان هوای سرد ایفا می‌کند، که می‌تواند مانع خاموشی شعله شود.

5- جمع‌بندی

در این پژوهش تاثیر تزریق هوا روی یک شعله پیش‌آمیخته ضعیف در یک مشعل لایه‌ای در سرعت و نسبت هم‌ارزی‌های متغیر مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت تک جریانی، با افزایش نسبت هم‌ارزی تا نزدیکی نسبت استوکیومتری افزایش پایداری در ساختار شعله مشاهده می‌شود. در همین حالت با افزایش سرعت مخلوط تزریقی از سرعت 0.5 تا 1 متر بر ثانیه با کاهش میزان زاویه مایل، روند بهبود در پایداری شعله برخاسته را خواهیم داشت، در حالی‌که با افزایش سرعت برای سرعت‌های بالاتر از 1 متر بر ثانیه شاهد کاهش این پایداری هستیم. در حالت چند جریانی با تزریق هوا از مجرای داخلی تاثیری در ساختار شعله مشاهده نمی‌شود. با تزریق هوا از طریق مجرای خارجی شاهد دگرگونی در پیکربندی شعله به یک شعله شبه مخروطی پایدار هستیم که در این حالت هوای تزریق شده به مجرای خارجی نقش عایق در مقابل جریان سرد محیطی را دارد. در نتیجه تزریق خارجی هوا تاثیر مثبتی در افزایش پایداری شعله دارد.

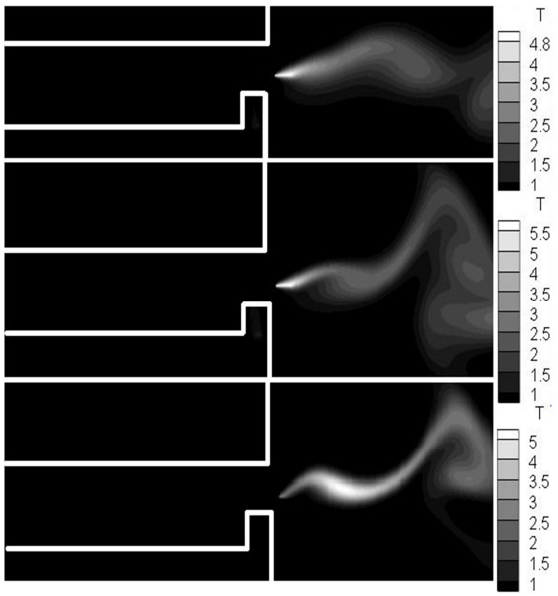

Fig. 4 Flame patterns of (a) cone flame, (b) lift-off flame in single-flow mode, and (c) cone like flame in co-flow mode.

شکل 4 الگوهای شعله الف: شعله مخروطی (Øm = 0.95)، ب: شعله برخاسته در حالت تک جریان(Øm = 0.85)، ج: شعله شبه مخروطی (Øm = 0.85)

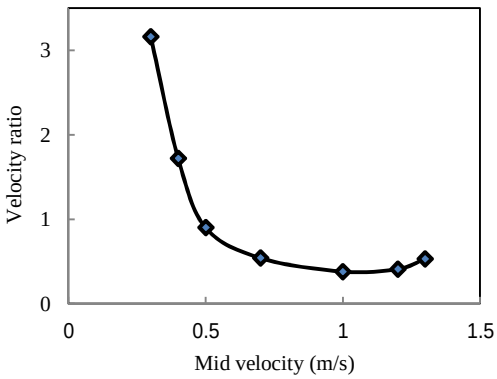

Fig. 5 Variation of configuration of flame in co-flow mode

شکل 5 تغییرات پیکربندی شعله در حالت چند جریان

6- مراجع

[1] E. Davide, M. Cavaliere, J. Kariuki, A Comparison of the Blow-Off Behaviour of Swirl-Stabilized Premixed, Non-Premixed and Spray Flames, Flow Turbulence Combust, Vol. 91, pp. 347-372, 2013.

[2] X. Paubel, A. Cessou, D. Honore, L. Vervisch, R. Tsiava, A flame stability diagram for piloted non-premixed oxycombustion of low calorific residual gases, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 3385-3392, 2007.

[3] J.H. kwark,Y.K. jeong, C.H. eon, Y.J. chang, effect of Swirl Intensity on the Flow and Combustion of a Turbulent Non-Premixed Flat Flame, Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 73, pp. 231-257, 2004.

[4] A. Ciani, W. Kreutner, W. Hubschmid, C.E. Frouzakis, Experimental investigation of the morphology and stability of diffusion and edge flames in an opposed jet burner, Combustion and Flame, Vol. 150, pp. 188-200, 2007.

[5] A. Hashemi, N. Hajialigol, A. Fattahi, K. Mazaheri, R. Heydari, Investigation of a flame holder geometry effect on flame structure in non-premixed combustion, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, pp. 3505-3512, 2013.

[6] V. Acharya, S. Shreekrishna, D. Shin, T. Lieuwen, Swirl effects on harmonically excited, premixed flame kinematics, Combustion and Flame, Vol. 159, pp. 1139-1150, 2012.

[7] L. Jin, Z. Huifu, Study of premixed flame stabilization by using opposed jet, SCIENCE IN CHINA (Series E), Vol. 41, pp. 77-81, 1997.

[8] C. Heeger, R.L. Gordon, M.J. Tummers, T. Sattelmayer, A. Dreizler, Experimental analysis of flashback in lean premixed swirling, flames: upstream flame propagation, *Exp Fluids*, Vol. 49, pp. 853-863, 2010.

[9] E. Cho, S. Chung, Improvement of flame stability and NOx reduction in hydrogen-added ultra lean premixed combustion, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, pp. 650-658, 2009.

[10] D. d'Humières, Multiple–relaxation time lattice Boltzmann models in three dimensions, Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 360, pp. 437-451, 2002.

[11] S. Succi, E. Foti, F. Higuera, Three-dimensional flows in complex geometries with the lattice Boltzmann method, *EPL (*Europhysics Letters), Vol. 10, pp. 433, 1989.

[12] R. Machado, Numerical simulations of surface reaction in porous media with lattice Boltzmann, *Chemical Engineering Science*, Vol. 69, pp. 628-643, 2012.

[13] C.M. Spadaccini, Combustion systems for power-MEMS applications, *Massachusetts Institute of Technology*, 2004.

www.SID.ir