مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14، ص‌ص 27-38

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر تغییر پارامترهای عملکردی بر رفتار شعله و توزیع دما و آنالیز اگزرژی مشعل‌های کم‌پیچش پیش‌آمیخته

سید ایمان پیش بین[1]، سید محمدرضا مدرس رضوی[2]، محسن قاضی خانی[3*]

1-دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
2- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
3- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
*مشهد، صندوق پستی 1111-91775، ghazikhani@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 05 اردیبهشت 1393
پذیرش: 15 خرداد 1393
ارائه در سایت: 19 مهر 1393

کلید واژگان:
توزیع دما
تحلیل اگزرژی
بازگشت ناپذیری
فاصله درنگ
پیچنده

چکیده

مشعل کم پیچش روشی موثر را برای افزایش پایداری در احتراق پیش آمیخته رقیق ارائه می‌دهد. نقش عدد پیچش به عنوان اصلی‌ترین پارامتر اثرگذار بر عملکرد این مشعل‌ها در مطالعات متعددی و در شرایط مختلف فشار، سرعت مخلوط، نسبت هم ارزی و مشخصات هندسی متفاوت بررسی شده است. فاصله پیچنده از سر مشعل (فاصله درنگ) یکی دیگر از پارامترهای اصلی در طراحی مشعل‌های کم پیچش است که تاکنون کمتر مورد توجه بوده است. در این تحقیق با طراحی و ساخت یک مشعل کم‌پیچش و برپایی یک بستر آزمون و اندازه‌گیری پارامترهای احتراقی شامل دمای شعله و محصولات احتراق در نقاط مختلف کوره، دبی، فشار و دمای سوخت و هوا و نیز آنالیز محصولات احتراق، اثر تغییر فاصله درنگ در نسبت‌های هم ارزی مختلف بر توزیع دما و رژیم شعله مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد افزایش فاصله درنگ موجب افزایش میزان برخاستگی شعله و افزایش بازه عملکرد پایدار آن می‌گردد. همچنین با استفاده از تحلیل اگزرژی عملکرد این مشعل‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد احتراق پیش‌آمیخته کم پیچش علی‌رغم کارکرد در شرایط رقیق، در حدود 17 درصد بازگشت ناپذیری کمتری نسبت به احتراق دیفیوژن داشته و از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک عملکرد مطلوبی دارد. همچنین انتقال حرارت به بدنه محفظه احتراق در حالت شعله برخاسته نسبت به شعله چسبیده حدود 14 درصد بیشتر است.

Investigation of the effects of performance parameters on the flame behavior and temperature distribution and exergy analysis of low swirl premixed burners

Seyyed Iman Pishbin, Seyyed Mohammad Reza Modarres Razavi, Mohsen Ghazikhani*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
*P.O.B. 91775-111, Mashhad, Iran, ghazikhani@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 April 2014
Accepted 05 June 2014
Available Online 11 October 2014

Keywords:
Temperature distribution
Exergy analysis
Recess length
Swirler

ABSTRACT

Low swirl burners present an effective approach to increase stability in lean premixed combustion. Effects of swirl number as a key parameter in the performance of these burners have been investigated in several studies with different conditions of pressure, bulk velocity equivalence ratio and geometrical specifications. Swirler distance from the exit, called recess length is another key parameter, which affects the performance of the burner and there are a few studies about its effects on the performance of the burner. In this study by design and fabrication of a low swirl burner and setup a rig test, several combustion parameters include flame temperature; flow rate, pressure and temperature of the air and fuel, and analysis of combustion products have been measured. And the effects of recess length and equivalence ratio variations on the performance of the low swirl burner have been studied. In addition, the exergy analysis has been done in order to investigate the performance of these burners. Results reveal that increasing recess length would result in wider range of lifted flame for different equivalence ratios. In addition, results also show that although low swirl combustion is working on lean condition, it has about 17 percent lower irreversibility ratio in comparison with diffusion flame from second law of thermodynamic point of view. Besides, the heat transfer ratio has been increased about 14 percent in the lifted flame in comparison with the attached flame.

1- مقدمه

احتراق پیش آمیخته رقیق یکی از بهترین گزینه‌ها برای کاهش آلاینده‌های احتراق به ویژه اکسید ازت است[1]. در این روش با کاهش نسبت هم ارزی سوخت به نسبت‌هایی بسیار پایین تر از یک، ترکیب سوخت و هوا رقیق شده

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
S. I. Pishbin, S. M. R. Modarres Razavi, M. Ghazikhani, Investigation of the effects of performance parameters on the flame behavior and temperature distribution and exergy analysis of low swirl premixed burners, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 14, pp. 27-38, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]

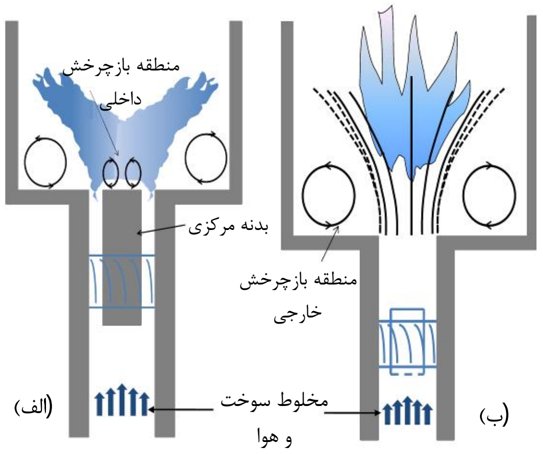
و از این طریق، دمای احتراق کاهش پیدا می‌کند و لذا تولید اکسید ازت نیز کاهش پیدا می‌نماید. نقطه ضعف این روش به دلیل کارکرد در شرایط رقیق، ناپایداری شعله است. به منظور برطرف نمودن این نقطه ضعف روش‌های مختلفی به کار گرفته شده‌اند، لیکن نقطه اشتراک این راهکارها، استفاده از جریان پیچشی در مخلوط سوخت و هوای پیش‌آمیخته است. از پیچش پیش از این در مشعل‌های دیفیوژن[1] برای افزایش راندمان احتراق استفاده می‌شد و به صورت مرحله‌ای سوخت و یا هوا از مجراهای پیچشی عبور داده می‌شدند. در فناوری احتراق کم‌پیچش، از پیچش به عنوان ابزاری به منظور برقراری پایداری استفاده می‌شود. به همین دلیل اصلی‌ترین پارامتر گروه‌بندی این مشعل‌ها نیز عدد بی‌بعدی به نام عدد پیچش تعیین شده است [2]. این عدد بر اساس حاصل تقسیم شار تکانه زاویه‌ای بر حاصل‌ضرب شار تکانه محوری در شعاع مشعل تعریف می‌شود (رابطه 1). شعله‌هایی با عدد پیچش کمتر از 0/6 کم پیچش، و شعله‌های با عدد پیچش بیش از 0/6 را شعله‌های پرپیچش می‌نامند [3].

$$S=\frac{G_{ang}}{R_b G'_x}=\frac{\int_0^{\infty}\rho U W r^2 dr}{R_b\int_0^{\infty}\rho\left(U^2\right) r dr} \quad (1)$$

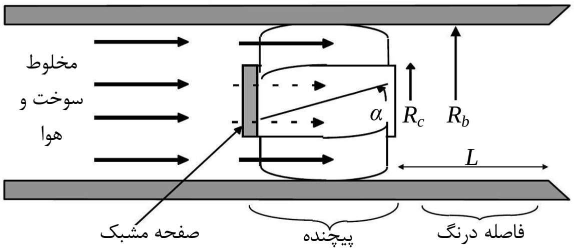
که در رابطه فوق، G_{ang} اندازه حرکت زاویه‌ای در بخش پیچشی است وG'_x شار اندازه حرکت خطی در هسته مرکزی بدون پیچش و حلقه‌های پیچشی است. امروزه در اکثر توربین‌های گاز از مشعل‌های پرپیچش[2] استفاده می‌شود. در این نوع مشعل‌ها پدیده‌ای به نام شکست گردابه‌ها، باعث به وجود آمدن یک ناحیه باز چرخش داخلی (IRZ[3]) در نزدیکی دهانه مشعل شده که موجب پایداری آن می‌گردد (شکل 1- الف). در این حالت، محصولات احتراق به دلیل چرخش بیشتر در محفظه، زمان بیشتری را در محفظه متوقف مانده و موجب افزایش تولید آلاینده اکسید ازت می‌شوند. برای برطرف کردن این معضل، در سال 1992 چان و همکاران مشعل کم‌پیچش[4] را معرفی کردند [4]. در این نوع مشعل، ناحیه بازگشتی نزدیک دهانه حذف شده و برای پایدار نگه‌داشتن شعله در این مشعل، جریان هوا به صورت مماسی توسط نازل‌هایی به مجرا وارد شده و پس از مخلوط شدن با جریان سوخت که به صورت محوری در جریان است از سر مشعل خارج می‌شود. این تکنولوژی را مشعل پیچشی تزریقی[5] می‌نامند [5] (مطابق شکل 1- ب). محل تشکیل شعله، نقطه‌ای است که سرعت شعله با سرعت مخلوط سوخت و هوا برابر شود. در این مشعل‌های کم‌پیچش به دلیل اضافه شدن هسته‌ای از جریان محوری بدون پیچش، سرعت محوری در خروجی افزایش یافته و لذا محل تشکیل شعله به پایین دست مشعل منتقل شده، و شعله‌ای برخاسته[6] تشکیل می‌گردد. این موضوع مهم‌ترین مزیت و ویژگی خاص مشعل کم‌پیچش است که می‌تواند شعله‌ای برخاسته و واگرا و پایدار را به وجود آورد.

چنگ ویگی‌آن در سال 1996 از یک پیچنده مطابق شکل2 برای ایجاد جریان پیچشی بهره بردند، تا از این طریق ضمن ساده‌سازی امکان ساخت، هزینه ساخت را نیز کاهش داده و عملکرد بهتری از این نوع مشعل‌ها به دست آورند [1].

1- Diffusion
2- High swirl burners (HSB)
3- Inner recirculation zone (IRZ)
4- Low swirl burner (LSB)
5- Low swirl injector (LSI)
6- Lifted flame



شکل1 تصویر شماتیک مشعل پرپیچش (الف) کم پیچش (ب)



شکل 2 تصویر شماتیک مشعل کم پیچش و پارامترهای هندسی حاکم بر آن

مطابق شکل 2 پیچنده از دو قسمت تشکیل شده است. بخشی از مخلوط سوخت و هوا از صفحه مشبک میانی عبور کرده و جریان مغشوش محوری را شکل می‌دهد، بخش دیگری از مخلوط نیز با عبور از میان پره‌ها جریان پیچشی اطراف را به وجود می‌آورد. این دو جریان پس از عبور از پیچنده با هم ترکیب شده و نهایتاً از سر مشعل خارج می‌شوند. مشابه هر پدیده دیگری در علم مکانیک، سه گروه خواص هندسی، سینماتیکی و دینامیکی بر عملکرد احتراق موثرند. در یک پیچنده پارامترهای هندسی متعددی نقش دارند. مطابق شکل 3، شعاع مشعل (R_b)، شعاع قسمت مرکزی (R_c)، زاویه پره‌ها (α)، تعداد پره‌ها، درصد انسداد صفحه مشبک، فاصله درنگ (L) یا فاصله پیچنده از سرمشعل[7]، عوامل اصلی هندسی اثرگذار بر عملکرد مشعل هستند. مطالعات متعددی در خصوص نقش هندسه پیچنده در عملکرد مشعل انجام شده است. چنگ به منظور محاسبه عدد پیچش با استفاده از ابعاد هندسی، رابطه 2 را ارائه کرده است. این عدد بی بعد مهم‌ترین پارامتر در بررسی عملکرد مشعل‌های پیچشی است. چنانچه از خواص هندسی مشعل استفاده شود، چنگ پیشنهاد کرده که می‌توان رابطه 1 را با در نظر گرفتن فرضیاتی، برای مشعل‌های کم‌پیچش به صورت رابطه 2 ساده‌سازی کرد [1]:

$$S=\frac{2}{3}\tan\alpha\frac{1-R^3}{1-R^2+[r_m^2(1/R^2-1)^2]R^2} \quad (2)$$

که در آنR نسبت شعاع مجرای مرکزی به شعاع مشعل است؛ $R=R_c/R_b$، و r_m نسبت شار جرمی $\dot{m}_c/\dot{m}_a$ است و $\dot{m}_c$ مربوط به جریان جرمی میانی و $\dot{m}_a$ مربوط به اطراف است. مطابق رابطه فوق، تمامی پارامترهای هندسی مشعل به جز فاصله درنگ (L) در رابطه اثرگذار بوده و چنگ بازه $1R<L<4R$ را برای مشعل‌های پیچشی پیشنهاد داده است [6].

چنگ و همکاران در سال 2000 با بررسی هندسه‌های مختلف مشعل و پیچنده و تأثیر تغییرات آن بر حد خاموشی شعله، پیشنهاد کرده‌اند در

7- Recess length

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]

مشعل‌های کم‌پیچش نسبت شعاع مجرای مرکزی به شعاع مشعل در بازه (0.5<R<0.8) و زاویه پره‌ها در بازه (45> α >37 درجه) انتخاب شود [1]. بالاچی و همکاران در سال 2013 با ساخت مشعل‌هایی با ظرفیت‌های متفاوت و زوایای پیچش مختلف ($\alpha = 35^\circ, 37.5^\circ, 40.4^\circ, 44.4^\circ, 47^\circ$)، اثرات هر یک را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق با برپایی یک بستر تست آزمایشگاهی بازه‌های مختلفی از ابعاد هندسی مشعل، عدد پیچش و نوع سوخت و اثرات آن بر پایداری شعله بررسی شده و بر این اساس، رابطه‌ای را بر اساس نسبت سرعت شعله آرام سوخت‌های مختلف به سرعت شعله آرام متان به منظور پیش‌بینی حد خاموشی مشعل کم‌پیچش پیشنهاد کرده‌اند[7].

هرچند مهم‌ترین مزیت مشعل‌های کم‌پیچش عملکرد پایدار آن‌ها در شرایط رقیق است اما مطالعاتی نیز در خصوص بهبود حد خاموشی و افزایش بیشتر بازه عملکردی این مشعل‌ها انجام شده است. چنگ و همکاران در سال 2010 نشان دادند که ترکیبات مختلف سوخت‌های هیدروکربنی بر کارایی کلی مشعل و میزان آلایندگی آن تأثیر چندانی نداشته و در همه موارد عملکرد مشابهی توسط مشعل کم‌پیچش ایجاد می‌شود [5]. عمادی و همکاران در سال 2012 به بررسی تغییرات ساختار شعله و حد خاموشی شعله ناشی از غنی‌سازی آن با هیدروژن پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزودن مقدار معینی هیدروژن حد خاموشی را گسترده‌تر می‌سازد و محدوده پایداری را افزایش می‌دهد [8].

همچنین با توجه به نقش مهم نواحی باز چرخش و نیز میزان پیچش به عنوان پارامترهای سیالاتی بر عملکرد مشعل‌های پیچشی، محققین به بررسی و مقایسه ساختار جریان در شرایط سرد (غیر واکنشی) و در حالت واکنشی پرداخته‌اند. جانسون و همکاران در سال 2005 به کمک PIV[1]، رژیم جریان سرد (غیر واکنشی) را با دو حالت واکنشی (دو نسبت هم ارزی متفاوت) مقایسه نموده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مشخصات جریان واکنشی در زیر لبه حمله جبهه شعله مشابه حالت غیر واکنشی بوده و در حالت واکنشی نیز یک منطقه بازچرخش داخلی ضعیف مشاهده گردید، اما این منطقه بسیار بالاتر از سرمشعل شکل گرفته و این موضوع تفاوت ساختاری نشان داده در شکل 1 را تأیید می‌کند [9]. در سال2008 منصور و همکاران مشخصات پایداری و ساختار شعله در احتراق کم پیچش را به وسیله تکنیک LIPF[2] و اندازه‌گیری میزان رادیکال‌های OH در واکنش مورد بررسی قراردادند. آن‌ها رابطه‌ای را بر اساس سرعت مماسی، سرعت محوری و قطر به منظور تعیین بازه عملکردی مشعل پیشنهاد کردند[10].

لگرند و همکاران در سال 2010 مشخصات جریان را در احتراق پیچشی مورد بررسی قرار داده و به کمک تصویربرداری لیزری رژیم جریان در پایین دست مشعل در حالت سرد (غیر واکنشی) و در حالت واکنشی را باهم مقایسه نموده‌اند. نتایج تحقیقات ایشان مشابهت‌ها و تفاوت‌هایی بین جریان سرد (غیر واکنشی) و جریان واکنشی را نشان می‌دهد. یکی از تفاوت‌ها، غالب بودن ساختار گردابه‌ها در جریان سرد (غیر واکنشی) است که دلیل آن، عدم حضور اغتشاشات ناشی از احتراق و تفاوت ناشی از نرخ انبساط گاز حین عبور از شعله است [11].

در این مطالعه به دلیل نقش مهم فاصله درنگ در میزان اختلاط سوخت و هوا و اثر آن در تغییر میزان پیچش، به بررسی تأثیر این فاصله در عملکرد احتراق پرداخته شده است. همچنین در مطالعات گذشته، توزیع دما در محفظه احتراق با توجه به نوع و شکل شعله کم‌پیچش، که کاسه‌ای شکل و پخشی است، کمتر مورد توجه قرار گرفته، که در مطالعه پیش رو، با قرار دادن مشعل در یک محفظه احتراق، و اندازه‌گیری نقطه به نقطه دمای داخل محفظه به بررسی اثر نسبت هم ارزی و اثر فاصله پیچنده از سرمشعل (فاصله درنگ) در توزیع دمای داخل محفظه احتراق پرداخته شده است. همچنین تاکنون در زمینه تحلیل مشعل‌های کم‌پیچش از دیدگاه اگزرژی تحقیقی مشاهده نگردیده و لذا در این مقاله با استفاده و اندازه‌گیری پارامترهای احتراقی شامل دمای شعله و محصولات احتراق در نقاط مختلف کوره (42 نقطه)، دبی، فشار و دمای سوخت و هوا و نیز آنالیز محصولات احتراق و اندازه‌گیری دمای بدنه کوره تحلیل ترمودینامیکی این احتراق مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

2- روش تجربی

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق ابتدا طراحی و راه‌اندازی یک بستر تست و آزمون صورت پذیرفت و از یک محفظه احتراق با شعاع 8 برابر شعاع مشعل استفاده گردیده است، تحقیقات نشان می‌دهد اگر شعاع محفظه احتراق 3 تا 5 برابر بزرگ‌تر از شعاع مشعل باشد، محفظه احتراق تاثیری بر ساختار شعله ندارد[12]. هوا توسط یک فن دور متغیر تأمین می‌شود و با نصب چند شیر سوزنی در مسیر سوخت و هوا کنترل دبی آن‌ها میسر شده است. دبی سوخت و دبی هوا توسط کنتور اندازه‌گیری می‌شود، همچنین دما و فشار سوخت و هوا توسط ترموکوپل‌های نوع کا (K) اندازه‌گیری و در یک دیتالاگر ذخیره می‌شود. آزمون‌ها در سرعت‌های مختلف و نسبت‌های مختلف هم‌ارزی سوخت و هوا انجام شده است. مشعل ساخته شده مطابق شکل 3 داری یک پیچنده با 16 پره بوده و قطر مشعل 69 میلیمتر و قطر مجرای داخلی آن 40 میلیمتر است. همچنین از یک صفحه مشبک در قسمت میانی پیچنده استفاده شده و لبه خروجی سرمشعل با زاویه 45 درجه پخ زده شده تا از تغییر ناگهانی جریان در خروجی مشعل جلوگیری شود. همچنین با قرار دادن مشعل در محفظه احتراق، عملکرد آن در تولید آلاینده و نیز توزیع دمای داخل محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 4 شمای بستر تست و آزمون و تجهیزات اندازه‌گیری آن نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری دمای بدنه کوره از یک دماسنج لیزری بستون مدل 900 (BE900) استفاده گردیده و محصولات احتراق نیز توسط دستگاه تستو مدل 350 (Testo 350–XL) اندازه‌گیری شده‌اند. این دستگاه پارامترهای (O_2, CO, CO_2, NO, NO_2, SO_x, UHC) را اندازه‌گیری می‌کند. در جدول 1 مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری، خطاها و عدم قطعیت تجهیزات ارائه شده است.

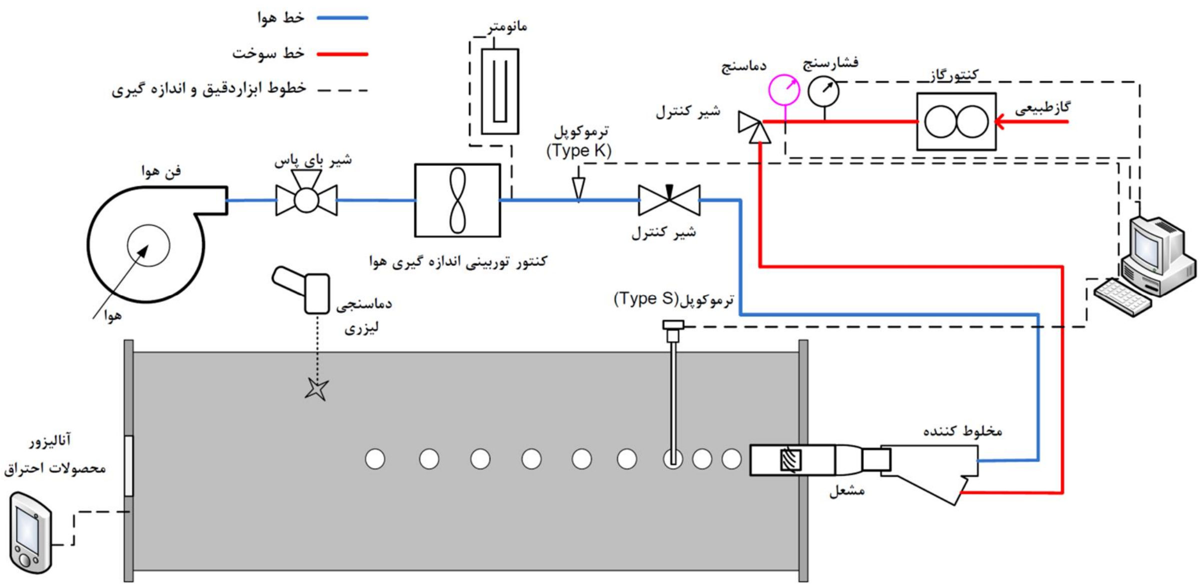
از گاز طبیعی با ارزش حرارتی 8080/153kcal/m3 به عنوان سوخت در این تحقیق استفاده شده که در جدول 2 ترکیبات آن ارائه شده است.

شکل3 پیچنده ساخته شده در این تحقیق

1- Particle image velocimetry
2- Laser induced pre dissociation fluorescence

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]



شکل4 بستر تست و آزمون و تجهیزات اندازه‌گیری

3- نتایج

در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی پرداخته می‌شود. علی‌رغم تحقیقات گسترده در زمینه مشعل‌های کم پیچش، موضوع توزیع دمایی داخل محفظه احتراق و تحلیل این نوع احتراق از دیدگاه اگزرژی کمتر مورد توجه قرار گرفته و لذا در این تحقیق این موارد با انجام آزمایش‌های متعدد بررسی شده‌اند.

3-1- بررسی اثر تغییر فاصله درنگ در عملکرد احتراق

فاصله درنگ، فاصله بین پیچنده تا سرمشعل است. در این فاصله مخلوط سوخت و هوای عبوری از پره‌ها که جریان پیچشی را به وجود آورده‌اند با جریان عبوری از صفحه مشبک میانی مخلوط می‌شوند. افزایش این طول، افزایش زمان ماندگاری واکنش دهنده‌ها در مشعل و نفوذ بیشتر جریان پیچشی به هسته را منجر می‌شود. این موضوع باعث تلف شدن ممنتوم زاویه-ای شده و از این طریق بر میزان پیچش جریان خروجی اثر می‌گذارد. از طرفی برای مشعل‌های پیچشی، دو حد ناپایداری وجود دارد: که شامل حد خاموشی[1] و برگشت شعله[2] است. در مشعل‌های کم‌پیچش، شعله در بالای مشعل و به صورت برخاسته تشکیل می‌شود. محل تشکیل شعله، مکانی است که سرعت شعله با سرعت مخلوط سوخت و هوا برابر شود. به دلیل استفاده همزمان از جریان پیچشی عبوری از پره‌ها و جریان مغشوش شده عبوری از صفحه مشبک مرکزی (شکل2) سرعت شعله آشفته[3] تغییر پیدا نموده و در نقطه‌ای در بالای مشعل این سرعت با سرعت مخلوط برابر می‌شوند و شعله‌ای واگرا و کاسه‌ای تشکیل می‌گردد. برای به دست آوردن محل تشکیل شعله می‌توان از تئوری بیان شده مطابق رابطه 3 استفاده کرد. بدین ترتیب اگر سرعت اولیه مخلوط سوخت و هوا U_0 فرض شود، از روابط زیر می‌توان محل تشکیل شعله را پیش‌بینی نمود [13].

$$U_0 - \frac{dU}{dx}(x_f - x_0) = S_T \qquad (3)$$

که در آن، X_0 موقعیت فرضی محلی داخل مشعل است که سرعت در آن نقطه برابر سرعت اولیه است. X_f محل تشکیل شعله و S_T سرعت شعله آشفته

جدول 1 تجهیزات اندازه‌گیری، خطاها و عدم قطعیت

تجهیز	نمونه	واحد	دقت	خطای مطلق	انحراف معیار
آنالیزور گاز تستو 350	O_2	%	0/01	0/008	±2%
	CO_2	%	0/01	0/008	
	H_2	ppm	1	-	
	UHC	ppm	1	-	
	CO	ppm	1	10	
	NO_2	ppm	0/1	5	
	NO	ppm	1	10	
	NO_X	ppm	1	10	
	واحد	دمای مرجع	خطای مطلق	عدم قطعیت	
ترموکوپل نوع S	°C	800/7	-0/70	±2/10°C	
	°C	1000/5	-0/50		
	°C	1200/8	-0/80		
دماسنج لیزری	°C	0-900	1.5	±6/45°C	
	$Q_{min}(m^3/h)$	$Q_{max}(m^3/h)$	دقت استاندارد		
کنتور توربینی	6/4	160	±2% از Q_{min} تا $0/2Q_{max}$		
			±1% از $0/2Q_{max}$ تا Q_{max}		
کنتوردیافراگمی	0/16	25	±3% از Q_{min} تا $2Q_{min}$		
			±2% از $2Q_{min}$ تا Q_{max}		

جدول 2 ترکیبات گاز طبیعی

فرمول گاز	درصد مولی (%)	فرمول گاز	درصد مولی (%)
CH_4	98/231	$n\text{-}C_5H_{12}$	0/026
C_2H_6	0/551	$C_6H_{14}^+$	0/039
C_3H_8	0/052	CO_2	0/509
$i\text{-}C_4H_{10}$	0/041	N_2	0/496
$n\text{-}C_4H_{10}$	0/033	H_2S	3ppm
$i\text{-}C_5H_{12}$	0/022		

1- Blow off
2- Flash back
3- Turbulent flame speed

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]

می‌باشد. از طرفی چنگ نشان داده که در مشعل کم‌پیچش، رابطه 4 بین سرعت شعله آرام و آشفته برقرار است، که در آن u' سرعت نوسانی مغشوش می‌باشد. با استفاده از روابط 3 و 4 و 5، نهایتاً رابطه 6 برای تحلیل محل تشکیل شعله حاصل می‌شود [13].

$$S_T = S_L + 2.16u' \tag{4}$$

$$1 - \frac{dU}{dx}\frac{(x_f - x_0)}{U_0} = \frac{S_L}{U_0} + \frac{2.16u'}{U_0} \tag{5}$$

$$x_f = x_0 + \frac{1 - \left(\frac{S_L}{U_0} + \frac{2.16u'}{U_0}\right)}{\frac{1}{U_0}\cdot\frac{dU}{dx}} \tag{6}$$

در رابطه 6 مقدار S_L/U_0 با فرض ثابت بودن نسبت هم‌ارزی، ثابت است. مقدار عبارت $2.16u'/U_0$ نیز با توجه تحقیقات انجام شده توسط چنگ و همکاران در سال 2011 [13] و نیز بیرر و همکاران در سال 2013 [14] ملاحظه می-شود ترم نوسانات (u'/U_0) در بازه گسترده‌ای از عدد رینولدز و نیز فشارهای کاری متفاوت تقریباً ثابت باقی می‌ماند. لذا محل تشکیل شعله تابعی از نرخ کشیدگی محوری[1] (a_x) مطابق رابطه 7 خواهد بود.

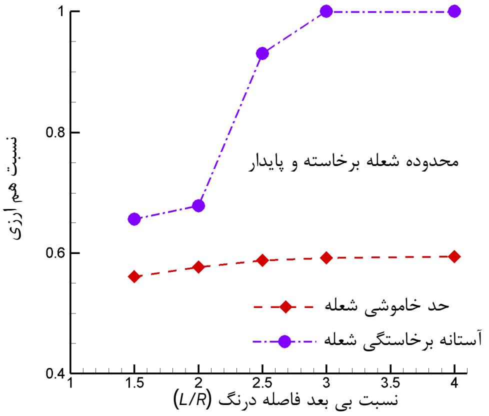
$$a_x = \frac{1}{U_0}\cdot\frac{dU}{dx} \tag{7}$$

چنگ نشان داده است که در یک هندسه ثابت مقدار عددی کمیت فوق با تغییر عدد رینولدز و سرعت مخلوط در حالت بدون احتراق تقریباً ثابت باقی می‌ماند [13]. انتظار می‌رود با افزایش فاصله درنگ، بخشی از ممنتوم زاویه‌ای از بین رفته و مقدار a_x با ثابت بودن سایر شرایط تغییر نماید. برای بررسی و تحلیل این موضوع، با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، اثر تغییر فاصله درنگ در نسبت‌های هم ارزی مختلف در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج به دست آمده، در شکل 5 مشاهده می‌گردد که با افزایش نسبت بی‌بعد طول درنگ (L/R)، مشعل در بازه بیشتری از نسبت‌های هم‌ارزی در حالت برخاسته قرار می‌گیرد، به نحوی که اگر این طول L>2.5R باشد، آنگاه برای تمامی نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از 1، شعله برخاسته خواهد بود و لذا از عملکرد پایدار و برخاسته شعله اطمینان بیشتری وجود خواهد داشت. از طرفی مشاهده می‌شود تغییر طول مجرای خروجی (فاصله درنگ) در حد خاموشی شعله وش یا عبارت "حد خاموشی" جایگزین و موارد به صورت زردرنگ های لایت گردید. رقیق شدن سوخت) میزان بازگشت ناپذیری احتراق متان افزایش شعله و تغییرات آن اثر چندانی نداشته است، این تحلیل تطابق خوبی با نتایج ارائه شده توسط یگی‌آن و چنگ دارد [6].

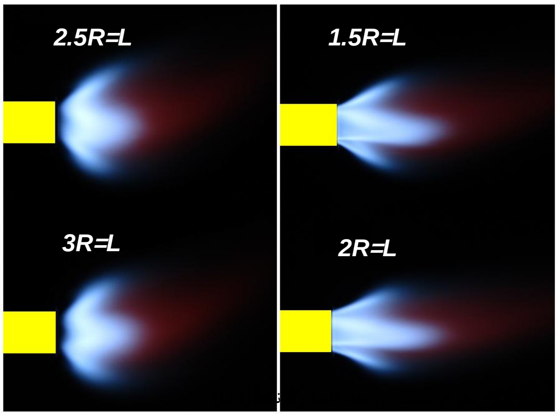
همان طور که در شکل 6 در حالت L=1.5R و L=2R ملاحظه می‌شود شعله به دهانه مشعل چسبیده است[2]. به دلیل اینکه در حالت 1.5R و 2R فاصله پیچنده تا دهانه اندک است، لذا جریان پیچشی عبوری از پره‌های پیچنده فرصت کافی برای ورود به بخش مرکزی و اختلاط با جریان عبوری از صفحات مشبک را نداشته و شعله به سطح مشعل می‌چسبد. با افزایش فاصله درنگ (L=2.5R و L=3R) رژیم متفاوتی از شعله که شعله برخاسته[3] است، به وجود می‌آید. در این حالت شعله شکل کاسه مانندی[4] داشته و با بیشتر شدن فاصله درنگ و ثابت باقی ماندن سایر شرایط تست، مدت زمان ماندگاری مخلوط در داخل مشعل بیشتر می‌شود. در نتیجه بخشی از جریان پیچشی اطراف با جریان میانی مخلوط شده و با تغییر سرعت مخلوط سوخت و هوا، مکان تشکیل شعله از مشعل فاصله گرفته و شعله برخاسته‌ای به وجود می‌آید.

برای یک شعله کم پیچش مطابق شکل 7، سه پارامتر هندسی قابل اندازه‌گیری است. لذا با عکس‌برداری از شعله و استفاده از سیستم پردازش تصاویر در این تحقیق، میزان برخاستگی شعله (Z) اندازه‌گیری و نتایج در شکل 8 نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش فاصله درنگ، به دلیل افزایش سرعت جریان محوری در پایین دست مشعل، در یک نسبت هم ارزی ثابت، محل برابری سرعت شعله و سرعت مخلوط به پایین دست منتقل شده و میزان ارتفاع برخاستگی افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که در یک فاصله درنگ و طول مجرای خروجی ثابت، با کاهش نسبت هم ارزی و رقیق شدن مخلوط میزان برخاستگی بیشتر شده است. این موضوع به این دلیل رخ داده که با رقیق شدن مخلوط، سرعت شعله کاهش یافته و لذا در نقطه دورتری از مشعل شرط برابری سرعت محقق شده است.

برای اطمینان و ارائه تحلیلی بهتر از نتایج آزمایشگاهی، با استفاده از یک دستگاه بادسنج تستو مدل 410 و نصب آن در فاصله 50 میلی‌متری پایین دست سر مشعل، و ثابت نگه داشتن سرعت اولیه در دو سرعت 7/9 و 5/48 متر بر ثانیه و در حالت سرد غیر واکنشی، تغییرات اندازه میانگین سرعت در بالای سرمشعل با تغییر گام به گام فاصله درنگ اندازه‌گیری شده که نتایج آن در شکل 9 ترسیم شده است.



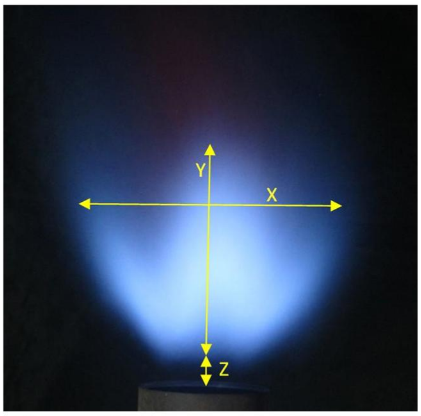
شکل5 تاثیر تغییر فاصله درنگ در محدوده پایداری شعله



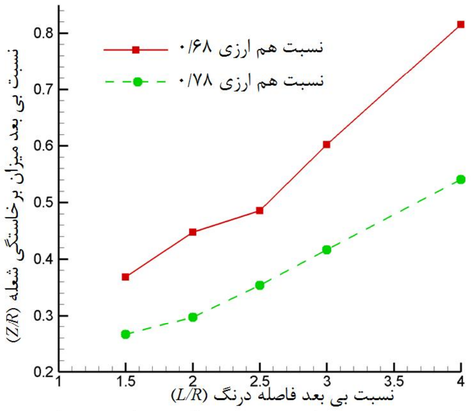
شکل6 تغییرات شعله با تغییر فاصله درنگ در نسبت هم ارزی0/85

1- Axial stretch rate
2- Attached Flame
3- Lifted flame
4- Bowl-shaped

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]



شکل ۷ تصویر شعله برخاسته مشعل کم پیچش و پارامترهای قابل اندازه‌گیری

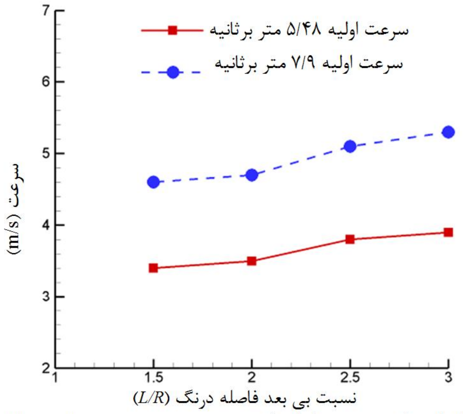


شکل ۸ اثر تغییر نسبت هم ارزی و فاصله درنگ برمیزان برخاستگی شعله

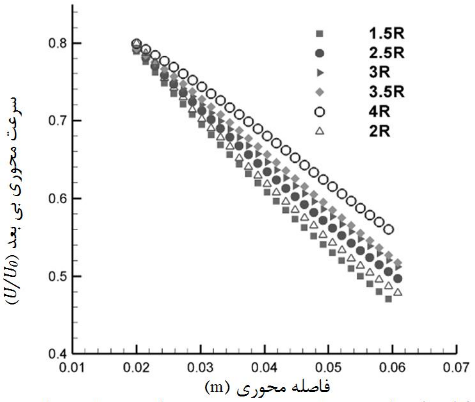
جهت مدل‌سازی سه بعدی جریان سرد (غیر واکنشی) مشعل کم پیچش در فواصل درنگ و اعداد رینولدز مختلف از نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۱۴/۵، استفاده شده است. در بهترین شبکه‌بندی انجام شده، محیط حل به ۱۳۴۸۱۸۵ سلول از نوع المان شش وجهی کاملاً سازمان یافته تقسیم شده‌است، که با افزایش بیشتر تعداد شبکه نتایج تغییر چشمگیری نداشته، درحالی‌که زمان محاسبات افزایش چشمگیری می‌یابد. شبکه در نزدیکی دیواره‌ها، در فضای بین پره‌های پیچنده و کانال مرکزی پیچنده، صفحات مشبک و نیز در قسمت خروجی جریان از سرمشعل به فضای کوره، به علت وجود تغییرات شدید جریان در این نواحی، ریزتر شده است. در این مدل‌سازی با توجه به وجود جریان‌های شدید پیچشی از مدل آشفتگی تنش رینولدز (RSM) استفاده شده تا بتواند ناهمسانگردی میدان تلاطم را مدل‌سازی نماید [۱۵].

شکل ۱۰ مقادیر بی‌بعد سرعت محوری (u/U_0) را در دهانه بالای مشعل نشان می‌دهد. از نتایج تجربی (شکل ۹) و نتایج مدل‌سازی (شکل ۱۰) ملاحظه می‌شود با ثابت بودن سرعت مخلوط اولیه (U_0)، و سایر پارامترهای هندسی، مقدار سرعت محوری در پایین دست با افزایش فاصله درنگ افزایش پیدا کرده است.

همچنین مقادیر a_x مطابق رابطه ۷ برای دو فاصله درنگ و سه عدد رینولدز متفاوت به دست آمده و با مقادیر تجربی ارائه شده توسط چنگ [۱۳] برای هندسه‌ای متفاوت از یک مشعل کم‌پیچش در شکل ۱۱ ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود تغییر عدد رینولدز با ثابت نگه داشتن پارامترهای هندسی بر میزان نرخ کشیدگی محوری (a_x) تأثیری نداشته و این موضوع نشان می‌دهد که در رابطه ۶ چنانچه نسبت هم ارزی سوخت و هوا و هندسه



شکل ۹ میانگین سرعت اندازه گیری شده بر روی سر مشعل در حالت سرد (غیر واکنشی) و با تغییر میزان فاصله درنگ در دو سرعت اولیه



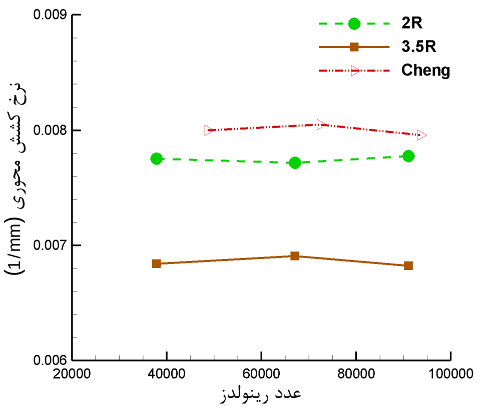
شکل ۱۰ مقادیر سرعت بی بعد محوری در پایین دست مشعل در فاصله درنگ‌های متفاوت

ثابت باقی بماند، تغییر مقادیر سرعت، بر محل تشکیل شعله اثری نخواهد داشت. لیکن مطابق شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود افزایش فاصله درنگ موجب کاهش مقدار نرخ کشیدگی محوری شده و از این طریق میزان برخاستگی شعله در یک نسبت هم ارزی ثابت افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده در شکل ۷ مطابقت دارد. این تحلیل را بر اساس نتایج مدل‌سازی به دست آمده برای فاصله درنگ‌های متفاوت مطابق شکل ۹ نیز می‌توان استنتاج نمود، بدین ترتیب که با افزایش فاصله پیچنده از سرمشعل، فرصت بیشتری برای اختلاط جریان پیچشی اطراف با جریان مغشوش میانی فراهم می‌آید و لذا نرخ پیچش کاهش یافته و مقدار سرعت محوری در خروجی افزایش می‌یابد و از طرفی گردایان سرعت محوری به دلیل کاهش واگرایی جریان و دور شدن پیچنده از مشعل کاسته می‌شود و لذا مقدار نرخ کشیدگی محوری (a_x) و مخرج کسر در رابطه ۶ کاهش می‌یابد و به تبع آن محل تشکیل شعله به پایین دست منتقل و برخاستگی شعله افزایش می‌یابد.

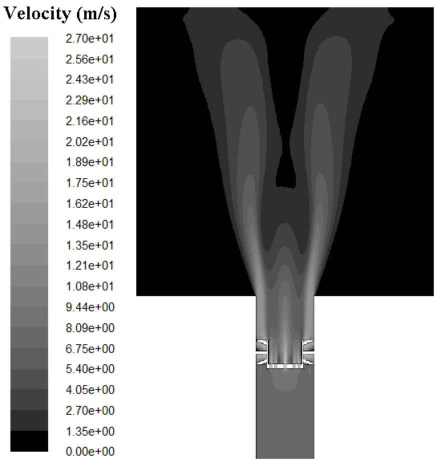
در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ کانتور سرعت جریان بر روی یک صفحه از مدل‌سازی انجام شده برای دو فاصله درنگ مختلف ($1.5R$ و $3.5R$) ترسیم شده است. در مقایسه این دو کانتور نیز افزایش سرعت در پایین دست مشعل با افزایش فاصله درنگ مشهود است.

چنگ یکی از مهم‌ترین مزیت‌های مشعل‌های کم‌پیچش را مقیاس پذیری آن عنوان نموده است[۶]. به نحوی که می‌توان قطر و به تبع آن ظرفیت مشعل را افزایش داد و اگر تغییرات با ثابت نگه‌داشتن عدد پیچش باشد، نتایج عملکردی مشعل‌ها از نظر بازه پایداری قابل مقایسه خواهد بود. لیکن با توجه

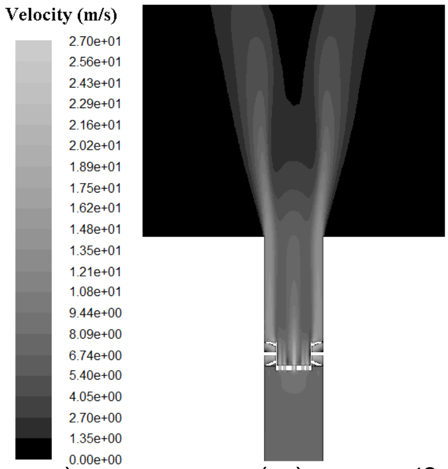
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]



شکل11 مقادیر نرخ کشش محوری در 2 فاصله درنگ متفاوت و در 3 عدد رینولدز مختلف در مقایسه با نتایج ارائه شده توسط چنگ [13]



شکل12 کانتور سرعت (m/s) در مدلسازی جریان سرد (غیر واکنشی) در فاصله درنگ L=1.5R



شکل13 کانتور سرعت (m/s) در مدلسازی جریان سرد (غیر واکنشی) در فاصله درنگ L=3R

به نتایج به دست آمده حاضر ملاحظه می‌شود در صورتی که مشعل‌های کم-پیچش برای کاربردهای صنعتی بکارگرفته شوند، لازم است به فاصله درنگ نیز به عنوان عاملی اثرگذار بر نرخ پیچش توجه شود. این موضوع وقتی اهمیت می‌یابد که برای مشعل‌هایی با ظرفیت بزرگ‌تر مقدار L=4R ابعاد و طول مشعل را بسیار بزرگ و غیرقابل توجیه برای تولید خواهد ساخت.

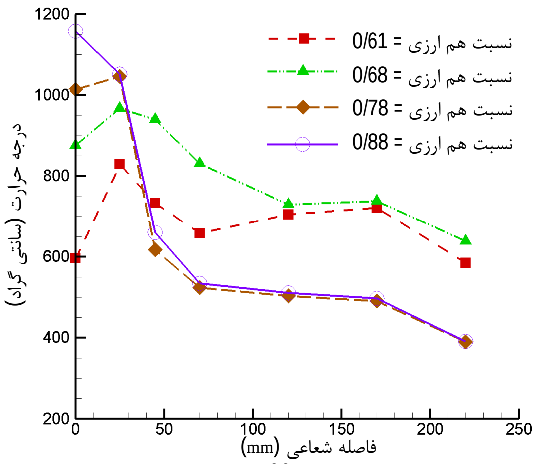
3-2- بررسی تأثیر تغییر نسبت هم ارزی در توزیع دما

با تغییر نسبت هم ارزی و ثابت نگه‌داشتن سایر شرایط کاری احتراق، اثر آن در پروفیل دمای داخل محفظه اندازه‌گیری شده است. شکل 14 توزیع دمای شعاعی در فاصله 183 میلی‌متری سرمشعل را در 4 نسبت هم ارزی مختلف نشان می‌دهد.

مطابق شکل14 ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت هم ارزی توزیع دمای شعله در محفظه احتراق تخت‌تر و یکنواخت‌تر شده، و محصولات احتراق با دمای بالاتری در مجاورت بدنه کوره قرار می‌گیرند. علت تغییر پروفیل دما در نسبت هم ارزی 0/78 تغییر رژیم شعله از حالت چسبیده به حالت برخاسته است. با رقیق‌تر کردن مخلوط سوخت و هوا، سرعت شعله کاهش یافته و از طرفی سرعت محوری به دلیل ثابت بودن سایر پارامترها ثابت باقی می‌ماند. لذا محل برابری سرعت‌ها و محل تشکیل شعله به پایین دست مشعل منتقل و شعله با ثابت بودن سایر شرایط برخاسته می‌شود. ضمن اینکه در حالت برخاسته شعله واگرا و پخشی بوده و مطابق شکل گردایان دمای شعاعی در حالت برخاسته و رقیق، کمتر و توزیع دما یکنواخت‌تر است. این موضوع موجب می‌شود بتوان از مشعل‌های پیچشی به عنوان یک مزیت در توزیع مناسب و یکنواخت دما در کوره و محفظه احتراق استفاده نمود.

4- تحلیل اگزرژی مشعل کم پیچش

در قسمت قبل مشاهده گردید که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مشعل کم پیچش شعله برخاسته و توزیع دمای خاص ناشی از آن در داخل محفظه احتراق است. از طرفی ملاحظه شد تغییر نسبت هم ارزی و نیز فاصله درنگ بر شکل شعله تأثیر مستقیم دارند. لذا برای انجام تحلیل کامل‌تری از اثرات این توزیع دما بر عملکرد احتراقی مشعل، تحلیل اگزرژی فرآیند نیز در این تحقیق انجام شده است. لذا با قرار دادن مشعل در یک محفظه احتراق، به صورت نقطه به نقطه دمای داخل محفظه و نیز روی سطح آن اندازه‌گیری شده است. در شکل‌های 15 و 16، 17 و 18 کانتورهای دمایی داخل محفظه احتراق برای دو نسبت هم ارزی (φ) و دو فاصله درنگ (L) مختلف ترسیم شده‌اند. برای تولید این کانتورها دمای داخل محفظه احتراق در 42 نقطه به وسیله ترموکوپل نوع S قرائت‌شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب نسخه12 و روش درون‌یابی مکعبی[1]، کانتورها به دست آمده‌اند.



شکل14 توزیع دمای شعاعی در 183 میلی متری سرمشعل در چهار نسبت هم ارزی مختلف و فاصله L=2R

1- Cubic interpolation

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]

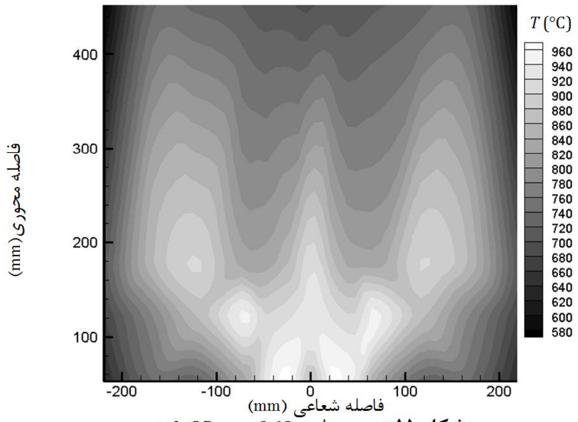
همان طور که ملاحظه می‌شود با رقیق شدن سوخت، در یک فاصله درنگ ثابت، توزیع دما پخش‌تر شده که این موضوع ناشی از تغییر رژیم شعله از حالت چسبیده، به برخاسته به وجود آمده است. (شکل ۱۵ و ۱۶). از طرفی افزایش طول درنگ و فاصله پیچنده از سرمشعل نیز نتیجه مشابهی داشته و در یک نسبت هم ارزی ثابت (و سرعت ثابت مخلوط سوخت و هوا) با افزایش این طول، شعله واگراتر و توزیع دما پخش‌تر شده است (شکل ۱۵ و ۱۷). در واقع با افزایش میزان فاصله درنگ، نسبت اندازه بردارهای سرعت محوری به اندازه بردارهای سرعت شعاعی در دهانه خروجی مشعل با ثابت بودن سرعت اولیه مخلوط سوخت و هوا، افزایش یافته و لذا محل تشکیل شعله بالاتر و موجب برخاستگی بیشتر شعله شده است. از طرفی رژیم توزیع محصولات احتراق داغ در مشعل پیچشی برخاسته بسیار متفاوت از شعله در حالت نزدیک و چسبیده به سرمشعل می‌باشد و توزیع همگون دما در ابتدای محفظه رخ می‌دهد. همچنین در مطالعه حاضر، به دلیل تغییر نسبت هم ارزی با سرعت مخلوط سوخت و هوا، و بر اساس رابطه ۵، از رابطه زیر به عنوان شاخص تغییرات رژیم شعله استفاده شده است که مطابق رابطه ۸، V_s سرعت نرمال شعله آرام می‌باشد.

$$V_s = \frac{S_L}{U_0} \times 10^3 \qquad (۸)$$

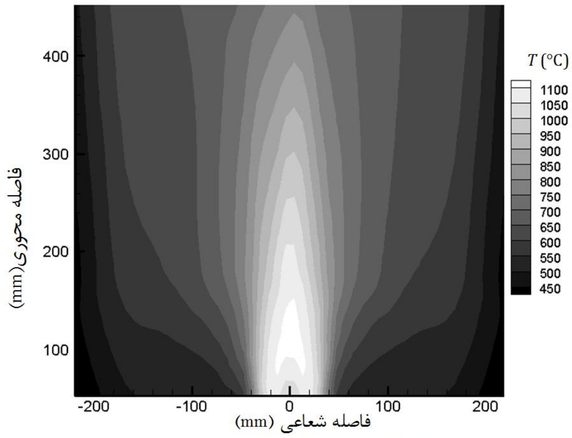
مقادیر سرعت نرمال شعله آرام در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ مقادیر سرعت نرمال شعله آرام در این تحقیق

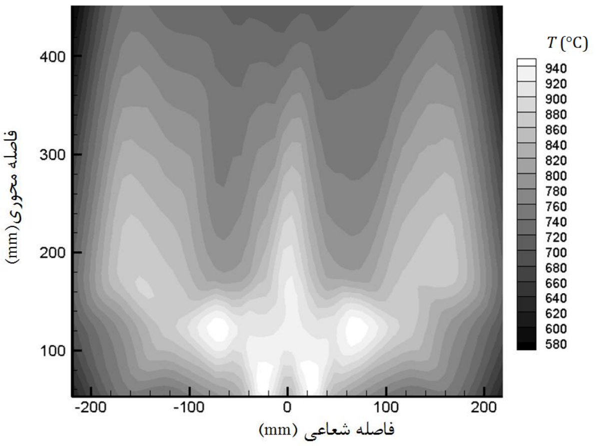
φ	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۷۸	۰/۸۷
S_L (cm/s)	۹	۱۴	۲۳	۲۷
V_s	۱۰/۳	۱۷/۱	۳۱/۹	۴۲/۹



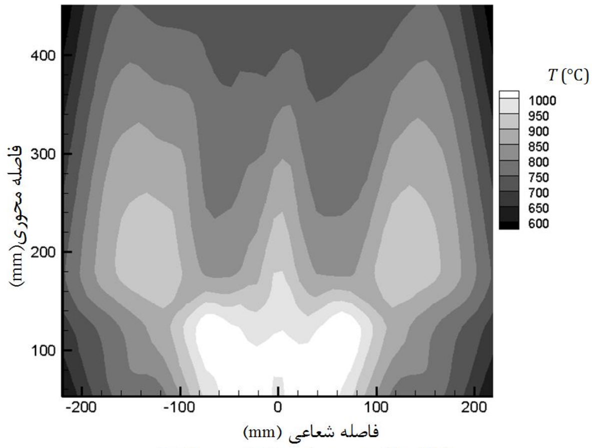
شکل ۱۵ توزیع دما در $\varphi = 0.68$ و $L=2R$



شکل ۱۶ توزیع دما در $\varphi = 0.78$ و $L=2R$



شکل ۱۷ توزیع دما در $\varphi = 0.68$ و $L=3R$

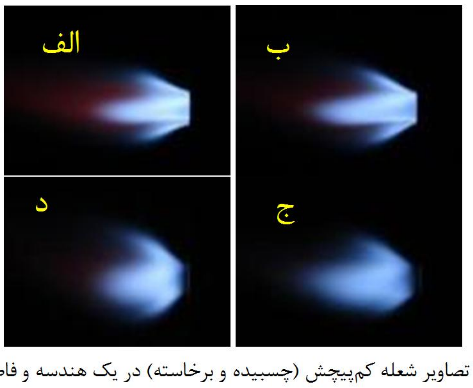


شکل ۱۸ توزیع دما در $\varphi = 0.78$ و $L=3R$

تغییرات سرعت نرمال شعله دو رژیم کاملاً متمایز را در مشعل کم‌پیچش به وجود می‌آورد. شکل ۱۹ این دو رژیم شعله (چسبیده و برخاسته) را به وسیله عکس‌برداری از شعله نشان می‌دهد.

۴-۱- روابط انرژی و اگزرژی سیستم

به منظور انجام تحلیل قانون دوم ترمودینامیک، از بالانس کلی اگزرژی می‌توان بهره گرفت. برای یک حجم کنترل که با محیط تبادل جرم و انرژی دارد، رابطه ۹ میزان کاردهی آن در واحد زمان را ارائه می‌دهد [۱۶]. در رابطه ۹، dA_{cv}/dt نرخ قابلیت کاردهی نسبت به زمان در سیستم است که برای



شکل ۱۹ تصاویر شعله کم‌پیچش (چسبیده و برخاسته) در یک هندسه و فاصله درنگ ثابت و مقادیر متفاوت سرعت نرمال: الف) V_s=۴۲/۹m/s، ب) V_s =۳۱/۹m/s ، ج) V_s =۱۷/۱m/s ، د) V_s =۱۰/۳m/s

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]

مطالعه حاضر صفر خواهد بود.

همچنین عبارت $W_{CV}-P_0.dV_{CV}/dt$ به دلیل نبود کار نیروی شفت و حجم اشغال شده ثابت صفر خواهد شد. اولین عبارت سمت راست معادله قابلیت کاردهی ناشی از انتقال حرارت از دیواره‌های محفظه احتراق در دمای مرزی T_j و نرخ انتقال حرارت Q_j است.

$$\int \frac{dA_{cv}}{dt} ds = \int_j \dot{Q}_j (1 - T_0 / T_j) ds - \left(W_{cv} - P_o \cdot dV_{cv} / dt\right) + \sum_i \left(\dot{n}_i \psi_i\right)_{in} - \sum_i \left(\dot{n}_i \psi_i\right)_{out} - \dot{I}_{CV} \quad (9)$$

همچنین T_0 دمای حالت مرده بوده که مقادیر ترموشیمیایی حالت مرده در جدول 4 ارائه شده است.

برای محاسبه میزان انتقال حرارت از محفظه احتراق به محیط، دیواره به 8 منطقه حرارتی تقسیم گردید، میزان دمای هر منطقه اندازه‌گیری و میزان انتقال حرارت جابجایی و تابشی محاسبه شده است. تلفات حرارتی از دیواره بدون عایق به محیط از رابطه 10 به دست می‌آید.

$$\dot{Q}_j = A \times \left[h_{conv}\left(T_j - T_{sur}\right) + h_r\left(T_j - T_{sur}\right)\right] \quad (10)$$

که در آن، h_{conv} و h_r به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی و تابشی هستند. جابجایی آزاد در سیلندر افقی محفظه احتراق و دیواره‌های عمودی آن رخ می‌دهد. عدد نوسلت (Nu) برای سیلندر افقی با قطر D از رابطه نیمه تجربی 11 قابل محاسبه است.

$$\overline{\mathrm{Nu}}_{\mathrm{D}} = \frac{hD}{K} = \left\{0.6 + \frac{0.387 Ra_{\mathrm{D}}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0.559/Pr)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}}\right\}^2$$

$$\mathrm{Ra_D} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\vartheta\alpha} \quad (11)$$

و برای صفحات عمودی دو طرف محفظه احتراق با طول L، عدد نوسلت توسط رابطه 12 محاسبه می‌شود.

$$\overline{\mathrm{Nu}}_{\mathrm{L}} = \frac{hL}{K} = \left\{0.825 + \frac{0.387 Ra_{\mathrm{D}}^{1/6}}{[1 + (0.492/\mathrm{Pr})^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 \quad (12)$$

همچنین ضریب انتقال حرارت تابشی از رابطه 13 به دست می‌آید. ضریب تشعشع برای فولاد ε=0/85 در نظر گرفته شده است[17].

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{sur})(T_s^{\,2} + T_{sur}^{\,2}) \quad (13)$$

اگزرژی در سیستم‌های چند جزئی از قسمت‌های ترمومکانیکی و شیمیایی تشکیل می‌شود. در رابطه 9، ψ_{in} و ψ_{out} میزان جریان اگزرژی ورودی و خروجی مولی هستند، که از رابطه 14 قابل محاسبه می‌باشند.

$$\psi = \sum_i \psi_i = \psi_i^{tm} + \psi_i^{ch} \quad (14)$$

با صرف‌نظر کردن از انرژی جنبشی، جریان اگزرژی ترمومکانیکی گونه شیمیایی i^{th} از رابطه 15 قابل محاسبه است.

جدول 4 مقادیر ترموشیمیایی در حالت مرده (P_0=0/101325 MPa و T_0=298/15 K)

ماده	نسبت مولی	ماده	نسبت مولی
H_2O	0/0188	N_2	0/7662
CO_2	0/0003	O_2	0/2055
سایر	0/0092		

$$\psi_i^{tm} = (h - h_0)_i - T_0(s - s_0)_i \quad (15)$$

همچنین اگزرژی شیمیایی گونه در مخلوط نیز از رابطه 16 به دست می‌آید.

$$\psi_i^{ch} = \varepsilon_i^0 + \tilde{R}T_0 lnY_i \quad (16)$$

که در رابطه فوق ε_i^0 اگزرژی شیمیایی استاندارد گونه i^{th} در مخلوط ورودی یا خروجی بوده و $\tilde{R}$ ثابت جهانی گازها و Y_i نسبت مولی گونه i^{th} است.

به دلیل اینکه رابطه 16 برای تمامی گونه‌های شیمیایی از جمله سوخت قابل استفاده است، بنابراین نیازی به محاسبه جداگانه اگزرژی سوخت وجود ندارد. همچنین نرخ بازگشت ناپذیری نیز از رابطه 17 محاسبه می‌شود.

$$Irr = \frac{\dot{I}_{cv}}{\dot{n}_f \psi_f} \quad (17)$$

در رابطه 9 و 17، $\dot{I}_{cv}$ نرخ بازگشت ناپذیری داخل حجم کنترل ناشی از انتقال جرم و حرارت، واکنش شیمیایی و اصطکاک ویسکوز است.

به دلیل اینکه مرزهای حجم کنترل در این مطالعه به دیواره‌های محفظه احتراق محدود شده‌اند، عبارت "بازگشت ناپذیری" در این مقاله به بازگشت ناپذیری احتراق اشاره دارد.

4-2- معادلات تولید آنتروپی در احتراق

تولید آنتروپی در احتراق می‌تواند ناشی از منابع زیر باشد: اصطکاک ویسکوز، تبادل حرارت و جرم، واکنش‌های شیمیایی و تابش حرارتی. تولید آنتروپی ویسکوز به دلیل تنش‌های برشی لزج به وجود می‌آید و از رابطه 18 که توسط پاپاسی [18] ارائه شده، قابل محاسبه است.

$$S_f''' = \frac{\mu}{T}\Phi \quad (18)$$

که در آن μ ویسکوزیته موثر مخلوط است و Φ تلفات ویسکوز بوده و توسط رابطه 19 محاسبه می‌شود [18].

$$\Phi = 2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{v}{r}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 \quad (19)$$

تولید آنتروپی ناشی از تبادل حرارت نیز یکی از منابع مهم دیگر تولید آنتروپی است که از رابطه 20 محاسبه می‌شود.

$$S_{th}''' = \frac{k}{T^2}(\nabla T)^2 = \frac{k}{T^2}\left[\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2\right] \quad (20)$$

که در آن k ضریب هدایت حرارتی موثر گاز است. تولید آنتروپی ناشی از واکنش‌های شیمیایی نیز توسط رابطه 21 که در آن ω (mole/m³.s) نرخ واکنش شیمیایی و μ_i پتانسیل شیمیایی گونه i^{th} است و توسط نیشیدا ارائه شده محاسبه می‌گردد [19].

$$S_{ch}''' = \frac{\omega}{T}\sum_{i=1}^{N}\left(\upsilon'_i - \upsilon''_i\right)\mu_i \quad (21)$$

مقدار پتانسیل شیمیایی (μ_i) و اگزرژی شیمیایی استاندارد(ε_i^0) گونه i^{th} به طور تقریبی باهم برابرند. همچنین آنتروپی ناشی از نفوذ جرم که ناشی از نیروی گرادیان فشار و سرعت است از رابطه 22 قابل محاسبه است.

$$S_m''' = \sum_{i=1}^{N}\rho D_{im}\left[\frac{R_i}{P}\frac{\partial Y_i}{\partial x_\alpha}\frac{\partial P}{\partial x_\alpha} + \frac{R_i}{Y_i}\frac{\partial Y_i}{\partial x_\alpha}\frac{\partial Y_i}{\partial x_\alpha}\right] \quad (22)$$

در رابطه فوق R_i، D_{im}، ρ و P به ترتیب ثابت گاز برای گونه i^{th}، ضریب نفوذ جرمی، چگالی مخلوط و فشار استاتیک است. از آنجا که مقدار گرادیان فشار داخل کوره اندک است از اولین عبارت داخل کروشه صرف‌نظر می‌شود.

4-3- نتایج و تحلیل محاسبات اگزرژی در مشعل کم پیچش

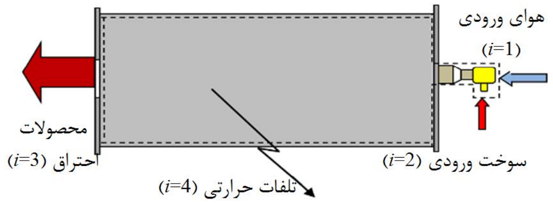
در شکل 20 تصویر شماتیک محفظه احتراق، حجم کنترل و ورودی و خروجی‌های سیستم نشان داده شده است. در جدول 5 مشخصات حرارتی و

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]

جدول ۵ مشخصات حرارتی و ترمودینامیکی شارهای جرمی و حرارتی عبوری از مرزهای حجم کنترل

V_s	i	دما T_i (°C)	فشار نسبی P_i (kPa)	آنتروپی s_i (kJ/kmol-K)	انرژی e_i (kJ/kmol)	تلفات حرارتی $\dot{Q}$ (kJ)	
۱۰/۳	۱	۳۴	۳/۷۲	۰/۸۵۰	۲۵۷/۰۷		
	۲	۲۵/۵	۲/۴۳	۱/۰۶۲	۳۱۸/۵		
	۳	۴۴۴	۰	۲۷/۸۵۷	۴۹۷۴/۸		
	۴	–	–	–	–	۵۲/۰۹	
۱۷/۱	۱	۴۶	۳/۸۱	۱/۹۶۸	۶۰۶/۳۰		
	۲	۳۰	۲/۴۳	۲/۴۷۳	۷۵۷/۱۲۶		
	۳	۴۶۷	۰	۲۸/۹۹۱	۵۵۴۸/۳		
	۴	–	–	–	–	۵۱/۶۰	
۳۱/۹	۱	۴۹	۳/۹۱	۲/۲۵۰	۶۹۶/۶۴۵		
	۲	۳۲	۲/۴۳	۲/۸۳۲	۸۷۱/۷۰۷		
	۳	۵۶۶	۰	۳۳/۴۶۵	۱۰۵۱۴/۹		
	۴	–	–	–	–	۴۶/۹۰	
۴۲/۹	۱	۴۹	۴/۰۲	۲/۲۵۰	۶۹۳/۷۳		
	۲	۳۰	۲/۴۳	۲/۸۲۱	۸۶۸/۹۹		
	۳	۵۷۹	۰	۳۴/۱۵۸	۱۰۶۲۴/۴		
	۴	–	–	–	–	۴۶/۹۱	



شکل۲۰ تصویر شماتیک کوره و حجم کنترل بکارگرفته دراین مطالعه

ترمودینامیکی شارهای عبوری از مرز حجم کنترل محاسبه و ارائه شده است. همان طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، نرخ مولی سوخت تقریباً ثابت باقی‌مانده و با افزایش نرخ مولی هوا، سرعت نرمال شعله آرام (V_s) نیز افزایش پیدا نموده است.

از ارقام ارائه شده در جدول ۵ مشاهده می‌شود که تغییرات انرژی خروجی از اگزوز در نقطه ۳ و میزان تلفات حرارتی در نقطه ۴ با میزان سرعت نرمال شده احتراق به طور قابل توجهی مرتبط بوده و در حالتهایی که این سرعت ۱۰/۳ و ۱۷/۱ بوده به دلیل برخاستگی شعله میزان تلفات اگزوز اندک و تبادل حرارت با بدنه بیش‌ترین مقدار را داشته است، این حالت با افزایش بیشتر این سرعت و تغییر رژیم شعله به حالت چسبیده تغییر پیدا نموده است. این موضوع، پروفیل‌های دمای ارائه شده در شکل‌های ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ را به خوبی توجیه می‌کند.

در حالت برخاسته توزیع مناسب و یکنواختی از دما در سطح محفظه احتراق به دلیل واگرایی بیشتر شعله به وجود می‌آید و محصولات احتراق با دمای بالاتری در تماس با بدنه کوره و محفظه احتراق قرار می‌گیرند. همچنین بر اساس روابط ۱۴ الی ۱۶، محاسبات اگزرژی در هر ۴ سرعت نرمال شده در جدول ۶ ارائه شده است.

بر اساس نتایج جدول ۶، به طور میانگین ۵۰/۵ درصد اگزرژی توسط انتقال حرارت از بدنه و ۱۳/۹ درصد اگزرژی توسط تلفات از دودکش منتقل می‌شود. بنابراین برای سرعت‌های نرمال شده در این تحقیق، نرخ بازگشت ناپذیری به طور میانگین ۳۵/۵ درصد خواهد بود.

نکته قابل توجه و جذاب در این نتایج، نرخ بسیار اندک بازگشت ناپذیری احتراق پیش‌آمیخته در این مطالعه در مقایسه با نتایج گزارش شده در خصوص احتراق دیفیوژن در تحقیقات گذشته است. جدول ۷ مقایسه‌ای بین این نتایج ارائه می‌کند. احتراق در شرایط رقیق موجب افزایش بازگشت ناپذیری می‌گردد [۲۰]. لیکن ملاحظه می‌شود در مشعل کم‌پیچش علی‌رغم کارکرد در شرایط نسبتاً رقیق نرخ بازگشت ناپذیری کمتری نسبت به احتراق دیفیوژن حاصل شده است. همچنین در مقایسه با نتایج ارائه شده توسط نیشیدا و همکاران در سال ۲۰۰۲ برای یک شعله پیش‌آمیخته آرام، میزان بازگشت ناپذیری مطالعه حاضر برای شعله پیش‌آمیخته آشفته نیز مقدار تقریباً مشابهی را نشان می‌دهد [۲۱].

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پارامترهای اثرگذار بر عملکرد و پایداری مشعل‌های پیش-آمیخته کم‌پیچش در قالب انجام تست‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار گرفته‌اند. در این مطالعه تمرکز بیشتر بر روی تأثیر فاصله درنگ بر عملکرد احتراق قرار گرفته و این موضوع که تاکنون

جدول ۶ محاسبات اگزرژی

V_s	i	اگزرژی (kW)	V_s	i	اگزرژی (kW)
۱۰/۳	۱	۰/۰۰۳۶۵	۱۷/۱	۱	۰/۰۱۸۹
	۲	۵۹/۴۴۸		۲	۵۸/۵۶۵
	۳	۷/۷۳۶		۳	۷/۶۶۲
	۴	۳۱/۲۵۹		۴	۳۱/۲۹۰
۳۱/۹	۱	۰/۰۲۱۱	۴۲/۹	۱	۰/۰۱۸۵
	۲	۵۷/۵۰۹		۲	۵۶/۶۱۹
	۳	۸/۵۹۱		۳	۸/۱۹۵
	۴	۲۷/۱۴۱		۴	۲۷/۳۵۵

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]

جدول 7 مقایسه نرخ بازگشت ناپذیری در چند نمونه مختلف احتراق

تجهیزات	نوع سوخت	نوع احتراق	بازگشت ناپذیری(%)	مرجع
نیروگاه بخار	زغال سنگ	دیفیوژن	71/1	رگولاگادا[22]
کوره	دیزل	دیفیوژن	52/9	اوزازامان[23]
دیگ	گازطبیعی	احتراق اکسیژنی	44	تانیگوچی[24]
کوره	متان (φ =0/7)	پیش آمیخته آرام	32/8	نیشیدا[21]
کوره	گازطبیعی (φ =0/68)	پیش‌آمیخته کم‌پیچش	33/5	مطالعه حاضر

کمتر مورد توجه قرار گرفته بود از جنبه‌های مختلف، مانند تأثیر آن بر بازه پایداری، میزان برخاستگی شعله، توزیع دما و نهایتاً بازگشت ناپذیری مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می-دهند که فاصله درنگ با میزان برخاستگی شعله رابطه مستقیم داشته و در یک عدد پیچش ثابت چنانچه میزان فاصله درنگ از مقدار معینی بیشتر شود، شعله در تمام نسبت‌های هم ارزی برخاسته و پایدار خواهد بود. همچنین نتایج نشان می‌دهند فاصله درنگ بر مقدار گرادیان سرعت محوری در پایین دست مشعل (نرخ کشیدگی محوری) به طور مستقیم اثرگذار بوده و با افزایش فاصله درنگ مقدار نرخ کشیدگی محوری کاهش می‌یابد. فاصله درنگ بر حد خاموشی شعله اثرگذار نبوده ولی در بازه عملکرد مشعل در حالت برخاسته تأثیر دارد و برای داشتن شعله‌ای برخاسته در تمامی نسبت‌های هم ارزی لازم است همواره در طراحی مشعل‌های پیچشی2.5> (L/R) باشد. لذا نتیجه‌گیری می‌شود که در این نوع احتراق؛ علاوه بر عدد بی بعد پیچش، نسبت بی بعد فاصله درنگ (L/R) نیز بر عملکرد مشعل موثر است.

همچنین نتایج نشان می‌دهند که شعله رقیق کم‌پیچش در حالت برخاسته توزیع مناسب و همگونی از گازهای داغ را در داخل محفظه احتراق ایجاد می‌کند. نرخ بازگشت ناپذیری احتراق پیش آمیخته رقیق نسبت به احتراق دیفیوژن نشان می‌دهد مشعل‌های کم‌پیچش از دیدگاه قانون دوم عملکرد بهتری داشته و در حدود 17 درصد بازگشت ناپذیری کمتری دارند. همچنین انتقال حرارت بدنه در حالت برخاسته نسبت به حالت چسبیده حدود 14 درصد بیشتر بوده و این موضوع مزایای شکل کاسه مانند شعله کم‌پیچش را اثبات می‌نماید.

6- فهرست علائم

A_{CV}	قابلیت کاردهی حجم کنترل
a_x	نرخ کشیدگی محوری
D_{im}	ضریب نفوذ گونه i^{th}
h	آنتالپی
h_{conv}	ضریب انتقال حرارت جابجایی
h_r	ضریب انتقال حرارت تشعشعی
Irr	بازگشت ناپذیری
i_{CV}	نرخ بازگشت ناپذیری
K	ضریب هدایت حرارتی
L	فاصله درنگ (m)
$\dot{m}_c$	دبی جرمی در مجرای مرکزی
$\dot{m}_a$	دبی جریان اطراف
Nu	عدد نوسلت
$\dot{n}_i$	نرخ شار مولی گونه i^{th}
P	فشار استاتیک (Pa)
P_0	فشار حالت مرده (MPa)
Pr	عدد پرانتل
$\dot{Q}_i$	انتقال حرارت از گونه i^{th}
R	نسبت شعاعی مشعل
R_i	ثابت گاز برای گونه i^{th}
$\bar{R}$	ثابت جهانی گازها
r_m	نسبت دبی جرمی
s_i	آنتروپی گونه i^{th}
S_L	سرعت شعله آرام($cm.s^{-1}$)
S_T	سرعت شعله آشفته($cm.s^{-1}$)
S'''_{gen}	تولید آنتروپی
S'''_{f}	تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک
S'''_{ch}	تولید آنتروپی شیمیایی
S'''_{th}	تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت
$\dot{S}_{gen}$	تولید آنتروپی کل
S	عدد پیچش
T_i	دمای گونه i^{th} (K)
T_o	دمای حالت مرده(K)
u	سرعت محوری($m.s^{-1}$)
U_c	سرعت محوری در مجرای مرکزی($m.s^{-1}$)
U_a	سرعت محوری در جریان پیچشی اطراف($m.s^{-1}$)
v	سرعت شعاعی($m.s^{-1}$)
V_{CV}	حجم کنترل
V_S	سرعت نرمال شده شعله آرام
W_{CV}	کار شفت
x_f	محل تشکیل شعله
x_o	نقطه مرجع
X_i	نسبت مولی گونه i^{th}
Y_i	نسبت جرمی گونه i^{th}

علائم یونانی

μ	لزجت موثر مخلوط ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ε	ضریب نشر
σ	ثابت استفمان-بولتزمان ($W m^{-2} K^{-4}$)
ω	نرخ واکنش شیمیایی
ψ_{in}	اگزرژی جریان ورودی (kW)
ψ_{out}	اگزرژی جریان خروجی(kW)
μ_i	پتانسیل شیمیایی گونه i^{th}
Φ	اتلاف ویسکوز
φ	نسبت هم ارزی
ε_i^o	اگزرژی شیمیایی استاندارد گونه i^{th} (kW)

مخفف‌ها

LSB	مشعل کم‌پیچش
HSB	مشعل پرپیچش
IRZ	ناحیه بازچرخش داخلی

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

7- تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب سپاسگزاری و قدردانی خود را از جناب آقای مهندس ایوب عادلی و تمامی همکاران ارجمند ایشان در شرکت شعله صنعت که در ساخت مشعل‌های بکارگرفته شده در این تحقیق ما را یاری نموده‌اند، و نیز شرکت گاز خراسان رضوی به عنوان حامی مالی پروژه ابراز می‌دارند.

8- مراجع

[1] R.K. Cheng, D.T. Yegian, M.M. Miyasato, G.S. Samuelen, C.E. Benson, R. Pellizzari, and P. Loftus, Scaling and development of low swirl burners for low emission furnaces and boilers, *Proceeding of Combustion Institute*, Vol.28 pp. 1305–1313, 2000.

[2] N. Syred, J.M. Beer, Combustion in swirling flows: a review, *Combustion and Flame*, Vol.23 pp.143–201, 1974.

[3] D.T. Yegian, R.K. Cheng, Development of a lean premixed low-swirl burner for low NO_x practical applications, *Combustion Science and Technology*, Vol. 139 pp.207-227, 1998.

[4] Chan, C. K., Lau, K. S., Chin,W. K., and Cheng, R. K., Freely Propagating Open Premixed Turbulent Flames Stabilized by Swirl, *Procedings of the combustion institue*, Vol.24 pp.511-518 (1992).

[5] R.K. Cheng, D. Littlejohn, D. Noble, T. Lieuwen, Laboratory Investigations of Low-Swirl Injectors Operating with Syngases, *Journal of Eng for Gas Turbines and Power*, Vol.132, pp.011502-1-8, 2010.

[6] D.T. Yegian, R.K. Cheng, Developmet pf a lean premixed low swirl burner for low NOx practical applications, *Comsution Science and Technology*, Vol.139, pp. 207-227, 1998.

[7] G.E. Ballachey, M.R. Johnson, Prediction of blowoff in a fully controllable low-swirl burner burning alternative fuels: Effects of burner geometry, swirl, and fuel composition, *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 34, pp.3193–3201, 2013.

[8] M. Emadi, D. Karkow, T. Salameh, A. Gohil, A. Ratner, Flame structure changes resulting from hydrogen-enrichment and pressurization for low-swirl premixed methane air flames, *Int Journal of hydrogen energy*, Vol.37, pp. 10397-10404, 2012.

[9] M.R. Johnson, D. Littlejohn, W.A. Nazeer, K.O. Smith, and R.K. Cheng, A comparison of the flowfields and emissions of High-Swirl Injectors and Low-Swirl Injectors for lean premixed gas turbines, *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 30, pp.2867–2874, 2005.

[10] M. Mansour, Y.C. Chen, Stability characteristics and flame structure of low swirl burner, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.32 pp.1390–1395, 2008

[11] M. Legrand, J. Nogueira, A. Lecuona, S. Nauri, and P. Rodriguez, Atmospheric Low Swirl Burner Flow Characterization with Stereo PIV, *Experiments in fluids*, 48: 901-913, 2010.

[12] R.K Cheng, Velocity and scalar characteristics of premixed turbulent flames stabilized by weak swirl, *Combustion and Flame*, Vol.101, pp.1-14, 1995.

[13] R.K. Cheng, D.Littlejohn W.A. Nazeer K.O. Smith, Laboratory studies of the flow field characteristics of Low-Swirl Injectors for adaptation to fuel-flexible turbines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 130, 2008.

[14] D. Beerer, V. McDonell, P. Therkelsen, R. Cheng, Flashback and turbulent flame speed measurements in a Hydrogen and Methane fired low-swirl injector at elevated pressures and temperatures, *8th U. S. National Combustion Meeting, University of Utah*, May 19-22, 2013

[15] F. Kiesewetter, C. Hirsch, J. Fritz, M. Kroner, T. Sattelmayer, Two-dimensional flashback simulation in swirling flows, *Proceedings of ASME Turbo Expo*, 2003

[16] K. Wark, *Advanced thermodynamics for Engineers*, McGraw Hill, Singapore, 1995.

[17] BE 900 Technical guidline, Bestone company

[18] H. Yapici, N. Kayatas, B. Albayrak, G. Basturk, Numerical calculation of local entropy generation in a methane-air burner, *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol.46, pp.1885 –1919, 2005.

[19] K. Nishida, T. Takagi, S. Kinoshita, Analysis of entropy generation and exergy loss during combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.29, pp.869–874, 2002.

[20] W.R. Dunbar, N. Lior, Sources of combustion irrevesibility, *Combustion Science and Technology*, Vol. 103, pp.41-61, 1994.

[21] K. Nishida, T. Takagim S. Kinoshita, Analysis of entropy generation and exergy loss during combustion, *Procedings of the combustion institue*, Vol. 29. pp. 869-874, 2002

[22] P. Regulagadda, I. Dincer, G.F. Naterer, Exergy analysis of a thermal power plant with measured boiler and turbine losses, *Applied Thermal Engineering*, Vol.30, pp.970–976, 2010.

[23] M.H. Uzzaman, R. Saidur, N.A. Rahim, Energy, exergy and economic analysis of an annealing furnace, *International Journal of the Physical Sciences*, Vol.6, pp.1257-1266, 2011.

[24] H. Taniguchi, K. Mouri, T. Nakahara, N. Arai, Exergy analysis on combustion and energy conversion processes, *Journal of Energy*, Vol.30, pp.111–117, 2005.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.5.0]