مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1394، دوره 15، شماره 5، ص‌ص 341-349

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی پایدارسازی یک شعله غیرپیش‌آمیخته آشفته با محیط متخلخل

سید عبدالمهدی هاشمی[1*]، احسان نوری[2]، علیرضا آقایی[3]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
*کاشان، صندوق پستی، 87317-51167، hashemi@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 15 بهمن 1393
پذیرش: 20 اسفند 1393
ارائه در سایت: 23 فروردین 1394

کلید واژگان:
احتراق
پایداری شعله
مشعل غیرپیش‌آمیخته
محیط متخلخل

چکیده

در این تحقیق پایدارسازی یک شعله‌ی غیرپیش‌آمیخته‌ی مغشوش به‌کمک محیط متخلخل، به‌صورت تجربی بررسی شده است. یکی از راه‌کارهای ارائه شده برای پایدار کردن شعله و رسیدن به فن‌آوری احتراق با توان حرارتی بالا استفاده از محیط متخلخل در مشعل است. برای انجام آزمایش‌ها از یک مشعل غیرپیش‌آمیخته با سوخت گاز طبیعی استفاده شده است. آزمایش‌ها ابتدا برای یک شعله غیرپیش‌آمیخته‌ی معمولی و سپس برای یک شعله غیرپیش‌آمیخته‌ی پایدار شده با محیط متخلخل انجام شده است. در شعله معمولی اثرات سرعت سوخت، سرعت هوا و نسبت هم‌ارزی بر طول شعله و مرز پایداری آن بررسی شده است. در شعله پایدار شده از محیط متخلخل سرامیکی کاربید سیلیسیم با چگالی‌های حفره 10، 20 و 30 حفره در اینچ (به‌ترتیب 4، 8 و 12 حفره در سانتی‌متر) و در فواصل 5، 10 و 15 سانتی‌متری از مشعل استفاده شده است. شعله‌ی پایدار شده با محیط متخلخل به چهار رژیم تقسیم‌بندی شده است. با توجه به آزمایش‌ها مشاهده شد که شعله معمولی در مخلوط‌های غنی تشکیل می‌شود و با افزایش نسبت هم‌ارزی طول شعله افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در شعله پایدار شده با افزایش چگالی حفره امکان تشکیل شعله داخل محیط متخلخل افزایش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده شد که تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل در متوسط نسبت هم‌ارزی 0/63 بوده که تقریباً با نسبت هم‌ارزی تشکیل شعله داخل محیط متخلخل در یک مشعل متخلخل پیش آمیخته برابر است.

Experimental study of a non-premixed turbulent flame stabilization with a porous medium

Seyed Abdulmahdi Hashemi*, Ehsan Noori, Alireza Aghaei

Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran
*P. O. B. 87317-51167, Kashan, Iran, hashemi@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 February 2015
Accepted 11 March 2015
Available Online 12 April 2015

Keywords:
Combustion
flame stability
non- premixed flame
porous medium

ABSTRACT

In this paper the stabilizing of non- premixed turbulent flame with a porous medium is studied experimentally. One of the approaches taken to stabilize the flame in high thermal capacity is the usage of the porous medium on the burner. A non-premixed burner with natural gas fuel is used. First, tests are carried out for the conventional burner and then for the combined burner with the carbide ceramics porous medium. In the conventional burner effects of fuel and air velocity and equivalence ratio on flame length, flame lift off and the stability limit are discussed. Porous silicon carbide ceramics with pore densities of 10ppi, 20ppi and 30ppi are used in the combined burner. Experiments are done at 5cm, 10cm and 15cm distances of porous medium from the burner. The viewed flames in the combined burner are grouped into four regimes. In conventional burner flame in a rich mixture is formed and flame length rises with increasing equivalence ratio. The results show that the porous medium with less pore density yields further possibility of flame formation in the medium. Moreover, it is observed that the flame is formed in the porous medium in an average equivalence ratio of φ=0.63, which is almost the equivalence ratio that an immersed flame is formed in a premixed porous burner.

1- مقدمه

احتراق در محیط‌های متخلخل به‌طور جدی از اواسط قرن بیستم میلادی مورد توجه قرار گرفت. ایجاد اغتشاش در جریان احتراقی، اختلاط بهتر سوخت و هوا و بهبود مکانیزم احتراق در شعله‌های پیش مخلوط، از اهداف اولیه به‌کارگیری محیط متخلخل در احتراق است. در سال‌های بعد مزایای فراوان محیط‌های متخلخل باعث شد تا تحقیقات بیش‌تری در این زمینه انجام شود. تحقیقات انجام شده در مورد سوخت‌های گازی همگی مربوط به استفاده از حالت پیش مخلوط سوخت و هوا است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

سوت [1] از اولین کسانی بود که به بررسی احتراق در محیط متخلخل پرداخت. او به‌طور آزمایشگاهی انتشار شعله و پایداری آن را در یک محیط شنی با اندازه دانه‌های متفاوت بررسی نمود. او نشان داد که سرعت شعله با کاهش اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد و سرعت انتشار شعله داخل محیط شنی حدود 0/1 میلی‌متر بر ثانیه است. او مدلی نیمه تجربی برای محاسبه سرعت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
S. A. Hashemi, E. Noori, A. Aghaei, Experimental study of a non-premixed turbulent flame stabilization with a porous medium, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 341-349, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.5.47.1]

شعله و تأثیر پیش گرمایش به‌وسیله هدایت حرارتی جامد ارائه نمود. چفین و همکاران [2] از اولین کسانی بودند که به انجام آزمایش‌هایی برای تعیین میزان آلاینده‌ها پرداختند. آن‌ها نشان دادند که انتشار ناکس[1] در محدوده نسبت هم‌ارزی 0/6 تا 0/95 در مشعل سرامیکی متخلخل به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. ساث و همکاران [3] مطالعه‌ای آزمایشگاهی و تئوری در زمینه‌ی کارکرد مشعل‌های تابشی انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند شعله یا در نیمه‌ی بالادست محیط متخلخل و یا در لبه‌ی پایین دست محیط پایدار می‌شود. همچنین آن‌ها گزارش نمودند که مدل‌سازی عددی نیز همین نتیجه را پیش‌بینی می‌کند. هاول و همکاران [4] به مرور احتراق سوخت‌های هیدروکربنی در محیط‌های متخلخل پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها اثر بعضی از خواص ترموفیزیکی محیط‌های متخلخل مانند ضریب هدایت حرارتی، بازده تابشی، ضریب انتقال حرارت بر احتراق به‌صورت تجربی و تئوری بررسی و مقایسه شد. بر اساس نتایج آن‌ها برای چگالی حفره 10ppi هم در بررسی آزمایشگاهی و هم در مطالعه تئوری، سرعت شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی زیاد می‌شود. البته نتایج تئوری مقادیر بیشتری را برای سرعت شعله پیش‌بینی می‌کنند. همچنین آن‌ها گزارش کردند برای چگالی‌های حفره مختلف در بررسی‌های تئوری و آزمایشگاهی، دمای بیشینه شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی زیاد می‌شود. مشابه تغییرات سرعت شعله، بررسی تئوری دمای بیشینه شعله را بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد. تریمیس و همکاران [5] پایداری شعله را برای مخلوط‌های گازی با دیفیوژن بالا در داخل محیط متخلخل خنثی بررسی کردند.

وگل و الزی [6] پایداری شعله را در یک مشعل متخلخل دو قسمتی فلزی بررسی کردند. بر اساس گزارش آن‌ها، در محیط متخلخل مورد بررسی برای نسبت هم‌ارزی بین 1/3 و 1/7، نوسان شعله مشاهده می‌شود. وود و هاریس [7] در مقاله‌ای به بررسی مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مشعل‌های متخلخل تا سال 2008 پرداختند. آن‌ها به این جمع‌بندی رسیدند که اگر نرخ جریان افزایش یابد، سرعت شعله زیاد شده و شعله به پایین‌دست حرکت می‌کند. کارینسوک و لپیراتاناکون [8] به مطالعه تجربی پایداری و توزیع دمای شعله در محیطی متخلخل پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش درصد هوای اضافی، دمای آدیاباتیک شعله کاهش و بیشینه دمای شعله ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. جوسیوسکی و همکاران [9] به مطالعه تجربی احتراق مخلوط رقیق متان- هوا در محیط متخلخل پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که دمای آغازش احتراق در محیط متخلخل به‌شدت وابسته به مساحت سطح جامد در تماس با فاز گاز است، به‌طوری‌که در مساحت کمتر دمای آغازش احتراق مقدار بیشتری دارد. کاتاپایان و همکاران [10] به مطالعه تجربی پایداری شعله در مشعل تابشی متخلخل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت هم‌ارزی، می‌توان در سرعت‌های ورودی بالاتر نیز شعله را پایدار کرد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که با افزایش نسبت هم‌ارزی دمای شعله زیاد می‌شود. وو و همکاران [11] به مطالعه تجربی مشخصه‌های احتراق پیش آمیخته در محیط متخلخل پرداختند. با توجه به نتایج آن‌ها با افزایش نسبت هم‌ارزی دمای بیشینه شعله زیاد شده و سرعت انتشار موج احتراقی کاهش می‌یابد. آودیک و همکاران [12] به مطالعه تجربی احتراق در یک محیط متخلخل برای مصارف خانگی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از مشعل متخلخل می‌تواند توان حرارتی را تا 8 برابر مشعل‌های معمولی افزایش داده و مقادیر مونوکسید کربن و ناکس را کاهش دهد. بکری و همکاران [13،14] به بررسی آزمایشگاهی احتراق در محیطی متخلخل با اندازه‌گیری آلاینده‌های مونوکسید کربن و ناکس تحت شرایط مختلف فشار و دما در ورودی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش فشار و پیش‌گرمایش مخلوط ورودی، موجب افزایش دمای احتراق و ناکس تولیدی شده و محل استقرار شعله را به سمت پایین دست مشعل متمایل می‌سازد. مقدار مونوکسید کربن گزارش شده در آزمایش آن‌ها تقریباً صفر است. ماتی و و همکاران [15] به بررسی محدوده پایداری شعله در محیط متخلخل پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که با افزایش نسبت هم‌ارزی و زیاد شدن هم‌زمان سرعت شعله، محدوده‌ی پایداری شعله برای پروپان و متان افزایش می‌یابد.

تیم‌وتی و همکاران [16] به بررسی عددی و تجربی احتراق در محیط متخلخل در یک مشعل با ابعاد کوچک پرداختند. آن‌ها در مدل عددی خود از فرض تعادل حرارتی بین فاز جامد و گاز استفاده کرده و مشاهده کردند که نتایج عددی و تجربی تطابق خوبی با هم دارند. با توجه به نتایج آن‌ها در تمامی حالات بررسی شده بیشینه تولید ناکس کمتر از 30ppm است. هاشمی و عطوف [17] مطالعه‌ی آزمایشگاهی جامعی در زمینه احتراق در محیط متخلخل سرامیکی کاربید سیلیسیم انجام دادند. آن‌ها گزارش کردند که شعله در سطح بالایی یا زیرین محیط متخلخل پایدار می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد که برای یک محیط با تخلخل مشخص، افزایش نرخ آتش، کاهش محدوده‌ی پایداری شعله را به‌همراه دارد. بر اساس نتایج آن‌ها هر چه نسبت هم‌ارزی کاهش یابد زمان برگشت شعله بیشتر می‌شود.

هاشمی و همکاران [18]، به بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها تغییر چگالی حفره محیط متخلخل، در مقادیر نسبت هم‌ارزی برای آستانه‌ی پایداری شعله برخاسته، تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند. هاشمی و همکاران [19]، در مطالعه‌ای تجربی اثر نرخ آتش و نسبت هم ارزی را بر عملکرد مشعل متخلخل فلزی تابشی بررسی نمودند. بیشترین دمای سطح در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از یک (0/7 تا 1) بوده و راندمان تابشی مشعل با افزایش نرخ آتش کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای عددی و تجربی هاشمی و همکاران [20]، شعله پایدار شده متخلخل-شعله آزاد را بررسی نموده و به مقایسه آن با مشعل متخلخل پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها شعله پایدار شده متخلخل-شعله آزاد دارای بازده حرارتی بیشتر و تولید اکسید نیتروژن کمتر است. هاشمی و همکاران [21]، به بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل فلزی -سرامیکی پرداختند بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش مقادیر نسبت هم‌ارزی، محل استقرار شعله به درون محیط متخلخل فلزی منتقل می‌شود. بررسی تجربی پدیده‌ی برگشت شعله در محیط متخلخل سرامیکی تحقیق دیگری از هاشمی و همکاران [22] است. بر اساس گزارش آن‌ها سرعت نفوذ شعله برای نسبت هم‌ارزی 1/06، با افزایش نرخ آتش کاهش می‌یابد. برای نسبت هم‌ارزی 1/86 سرعت نفوذ شعله ، ابتدا افزایش یافته و سپس به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد.

با توجه به کاربردهای گسترده‌ی مشعل‌های غیرپیش‌آمیخته در صنایع مختلف مانند خشک کردن چوب و کاغذ، خشک کردن رنگ، بازپخت پلاستیک‌ها، صنایع غذایی و پخت نان، استفاده از یک روش جدید و در عین حال ساده برای پایدارسازی این نوع شعله‌ها بسیار اهمیت دارد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، در اغلب مطالعات پیشین مشعل پیش آمیخته متخلخل مورد توجه بوده است. به همین دلیل در این تحقیق مشعل غیرپیش‌آمیخته به همراه پایدارساز محیط متخلخل شعله پایدار شده بررسی

1- NOX

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.5.47.1]

می‌شود. در این کار ابتدا شعله‌ی آزاد در مشعل غیرپیش‌آمیخته معمولی مورد مطالعه قرارگرفته و سپس شعله غیرپیش‌آمیخته پایدار شده با محیط متخلخل بررسی می‌شود.

در شعله معمولی تأثیر کمیت‌های سرعت سوخت، سرعت هوا بر ارتفاع برخاستگی شعله و مرز پایداری آن بررسی می‌شود. همچنین در بررسی شعله پایدار شده ابتدا انواع رژیم شعله‌ی ایجاد شده در آن معرفی می‌شود و در ادامه به مطالعه‌ی اثر چگالی حفره محیط متخلخل و ارتفاع آن از مشعل بر مرز تشکیل شعله‌ها پرداخته می‌شود. سپس به بحث در مورد مرز پایداری در یک شعله پایدار شده پرداخته می‌شود و اثر چگالی حفره‌های مختلف و ارتفاع محیط متخلخل از مشعل بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

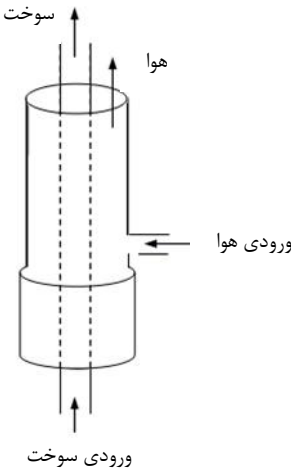
2- دستگاه آزمایش

دستگاه ساخته شده دارای اجزای مختلفی از جمله کمپرسور هوا، ریگلاتور، فیلتر هوا، روتامتر و مشعل است.

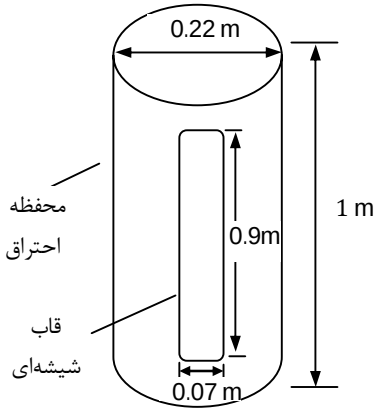
به‌منظور تأمین هوای مورد نیاز برای احتراق از کمپرسوری با قابلیت فشرده کردن هوا تا 10bar استفاده شده است. برای کاهش و تثبیت فشار هوا، از یک تنظیم کننده فشار و برای جلوگیری از ورود قطرات آب و ذرات گرد و غبار از یک فیلتر در مسیر هوا استفاده شده است تا از بروز خطای احتمالی در روتامتر جلوگیری شود. روتامتر هوا قابلیت اندازه‌گیری دبی در بازه‌ی کارکردی بین 2 تا 25 متر مکعب بر ساعت را با دقت اندازه‌گیری 0/5 متر مکعب بر ساعت دارد. بیشینه دبی قابل اندازه‌گیری با روتامتر سوخت، 10 لیتر بر دقیقه بوده و دقت آن 0/2 لیتر بر دقیقه است.

برای انجام آزمایش‌ها یک مشعل ساده غیر پیش‌آمیخته طراحی و ساخته شد. طرح‌واره بخشی از مشعل، محفظه احتراق و پایه نگه‌دارنده در شکل‌های 1 تا 3 نشان داده شده است. برای جلوگیری از نفوذ هوای اطراف به شعله، مشعل در داخل محفظه‌ی احتراق قرار داده شده است. ورودی سوخت از مرکز مشعل و ورودی هوا از دیواره‌های جانبی مشعل است. برای ورودی سوخت از لوله‌ای به قطر داخلی و خارجی به ترتیب 6 و 12 میلی‌متر استفاده شده است. ورودی هوا، لوله‌ای به قطر داخلی 22 میلی‌متر بوده که ورودی سوخت دقیقاً در مرکز آن قرار دارد و در نتیجه مجرای ورودی هوا، فضای حلقوی بین این دو لوله است. محفظه‌ی احتراق استوانه‌ای به قطر و ارتفاع 22 و 100 سانتی‌متر است. برای مشاهده‌ی انواع رژیم شعله، تنظیم فاصله‌ی محیط متخلخل از مشعل و عکس‌برداری از شعله، در جلوی محفظه‌ی احتراق برشی به عرض و ارتفاع 7 و 90 سانتی‌متر ایجاد شد. برای جلوگیری از ورود هوا از محل برش خورده، از یک قاب شیشه‌ای استفاده شده و همچنین به‌کمک چسب مخصوص تمام محل‌های احتمالی نفوذ هوا به‌طورکامل مسدود شد. برای نگه داشتن محیط متخلخل و نیز جابه‌جایی بهتر و دقیق‌تر آن نگه دارنده‌ای ساخته شده و محیط متخلخل روی آن قرار داده شد. نگه‌دارنده به‌کمک چرخ‌دنده‌هایی قابلیت حرکت در راستای طولی و شعاعی را دارا است. با توجه به گام چرخ‌دنده‌ها، دقت جابه‌جایی محیط متخلخل در این دستگاه برای هر دو راستا تقریباً برابر با 1 میلی‌متر است.

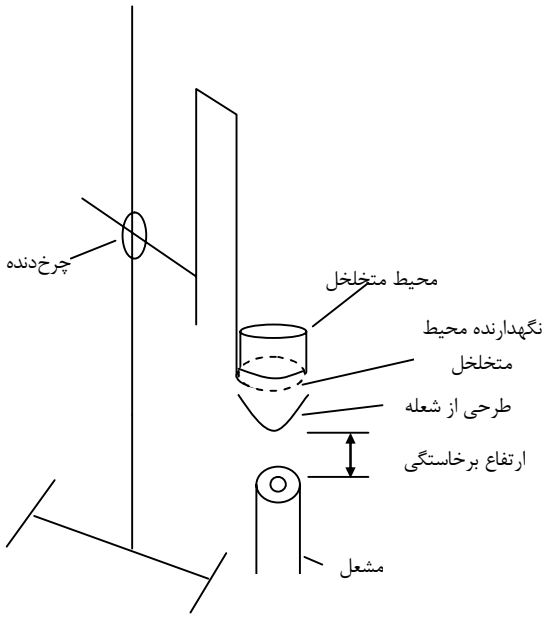
در مشعل، از محیط متخلخل سرامیکی از جنس کاربید سیلیسیم به شکل استوانه، با قطر 90 و ارتفاع 22 میلی‌متر و چگالی حفره 10ppi، 20ppi و 30ppi استفاده شده است. ضریب تخلخل محیط‌های متخلخل استفاده شده، 0/87 است.



شکل 1 طرح‌واره بخشی از مشعل



شکل 2 محفظه‌ی احتراق



شکل 3 نگه‌دارنده‌ی محیط متخلخل

3- نتایج

نتایج در دو بخش ارائه می‌شوند. در بخش اول یک شعله نفوذی معمولی بررسی می‌شود. ابتدا تأثیر کمیت‌های سرعت سوخت و سرعت هوا بر طول

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.5.47.1]

شعله در مشعل بررسی می‌شود. سپس طول برخاستگی شعله از پایه‌ی مشعل بررسی شده و نحوه‌ی برخاستگی و خاموشی شعله همراه با تصاویر مربوطه نشان داده می‌شود. در بخش دوم یک شعله نفوذی پایدار شده با محیط متخلخل بررسی می‌شود. در این بخش انواع رژیم شعله‌ی ایجاد شده در شعله پایدار شده معرفی می‌شود. در ادامه اثر چگالی حفره محیط متخلخل و ارتفاع محیط متخلخل از مشعل بر مرز تشکیل شعله‌ها مطالعه می‌شود. سپس مرز پایداری در یک شعله پایدار شده بررسی می‌شود و اثر چگالی حفره‌های مختلف و ارتفاع محیط متخلخل از مشعل بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن مرز پایداری شعله در مشعل معمولی و پایدار شده مقایسه می‌شود. پارامترهای استفاده شده برای بررسی پایداری مشابه برخی تحقیقات گذشته نظیر [23] است.

پیش از ارائه نتایج، روابط مورد استفاده در این مطالعه ارائه می‌شود. نسبت هم‌ارزی در احتراق، عبارت است از نسبت سوخت به هوا در حالت واقعی به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری که بر مینای جرمی و یا مولی بیان شده و از رابطه (1) به‌دست می‌آید.

$$\varphi=\frac{(F/A)}{(F/A)_{sto}} \quad (1)$$

نسبت سوخت به هوا تابع دبی سوخت و هوا است که با توجه به ثابت بودن سطح مقطع این دو تابع سرعت سوخت و هوا خواهد بود. کمیت فوق به طور عمده در احتراق پیش آمیخته مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی برای نشان دادن نسبت هوا و سوخت ورودی در یک مشعل غیر پیش آمیخته نیز به کار می‌رود [23].

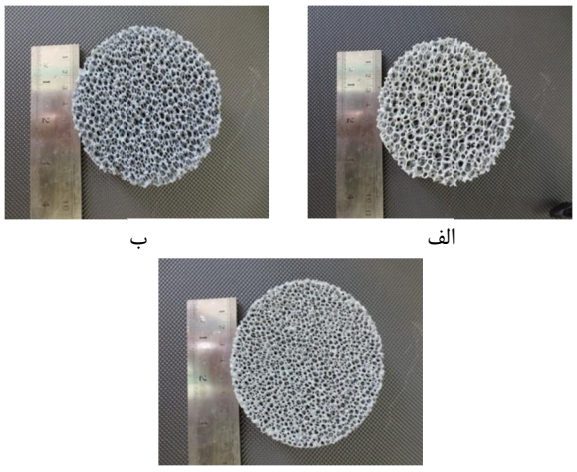
برای محاسبه سرعت سوخت و هوای وارد شده به محفظه‌ی احتراق از رابطه‌ی (2) استفاده می‌شود.

$$V=\frac{Q}{A} \quad (2)$$

سطح مقطع ورودی سوخت $A_f = 2/8\times10^{-5}m^2$ و سطح مقطع ورودی هوا $A_{air} = 2/67\times10^{-4}m^2$ است. در این مطالعه از چگالی‌های حفره 10، 20 و 30 حفره در اینچ (4، 8 و 12 حفره در سانتی‌متر) استفاده شده است. در شکل 4 چگالی حفره‌های مختلف به‌کار رفته را نشان می‌دهد.

3-1- مشعل غیرپیش‌آمیخته‌ی معمولی

در این بخش تأثیر سرعت سوخت بر محدوده پایداری یک شعله غیر پیش آمیخته معمولی بررسی می‌شود و ارتفاع و طول برخاستگی شعله در مرز پایداری محاسبه می‌شود. منظور از مرز پایداری حالتی است که با افزایش اندک دبی هوا یا سوخت، شعله پایداری خود را از دست داده و خاموش شود [24]. مرز پایداری در شعله‌های غیر پیش مخلوط برحسب سرعت هوا و سوخت یا کمیت هایی متنوعی که تابع این دو هستند بیان می‌شود [25،26]. در اینجا به منظور نشان دادن نسبت هوا به سوخت از نسبت هم ارزی کل استفاده شده است که تابع سرعت سوخت و هواست.

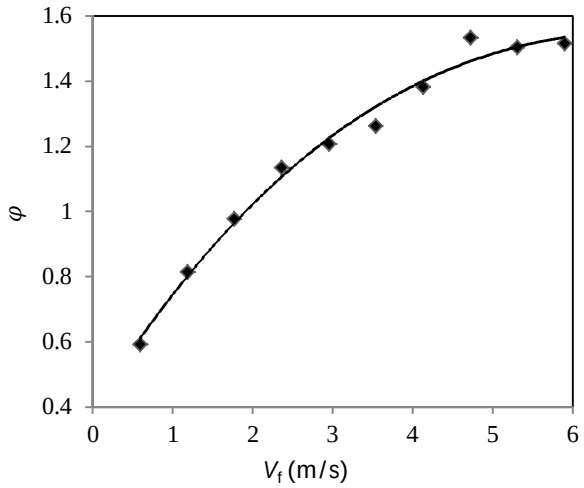

الف ب ج

شکل 4 محیط‌های متخلخل استفاده شده از جنس کاربید سلیسیم در چگالی‌های حفره (الف) 10 ppi، (ب) 20ppi و (ج) 30ppi

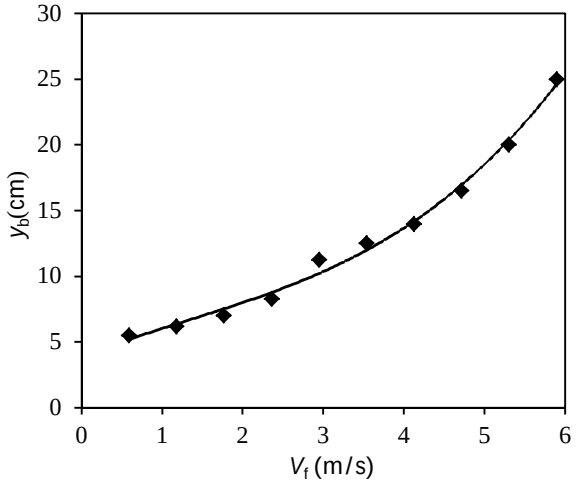
منحنی مرز پایداری برحسب سرعت سوخت و نسبت هم‌ارزی در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش سرعت سوخت از 0/5 تا 6 متر بر ثانیه شعله در نسبت هم ارزی‌های بزرگتری خاموش می‌شود که در سرعت‌های سوخت بالاتر از 2 متر برثانیه شعله فقط در نسبت پر سوخت (φ>1) پایدار است.

شکل 6 تغییرات طول برخاستگی شعله را بر حسب سرعت سوخت ورودی در مرز پایداری نشان می‌دهد. با افزایش سرعت سوخت ورودی طول برخاستگی شعله از مشعل نیز افزایش می‌یابد که این نتیجه منطبق بر نتایج تجربی دیگر است [25،26]. بررسی نتایج نشان می‌دهند که این رابطه نسبتاً خطی است که تأییدکننده نتایج مرجع [27] است.

تغییرات ارتفاع برخاستگی که در شکل 6 برحسب سرعت سوخت نمایش داده شده بود، به‌منظور نشان دادن نسبت هوا و سوخت بر حسب نسبت



شکل 5 نمودار نسبت هم‌ارزی برحسب سرعت سوخت در مرز پایداری



شکل 6 نمودار ارتفاع برخاستگی شعله بر حسب سرعت سوخت بر مرز پایداری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.5.47.1]

هم‌ارزی کل در شکل 7 نشان داده شده است. با توجه به شکل 7، ارتفاع برخاستگی در مخلوط‌های رقیق از سوخت و هوا ($\varphi<1$) تغییر چندانی ندارد. در مخلوط‌های غنی ($\varphi>1$)، ارتفاع برخاستگی تقریباً به‌صورت خطی با افزایش نسبت هم‌ارزی زیاد می‌شود.

3-2- مشعل غیرپیش‌آمیخته ترکیبی با محیط متخلخل

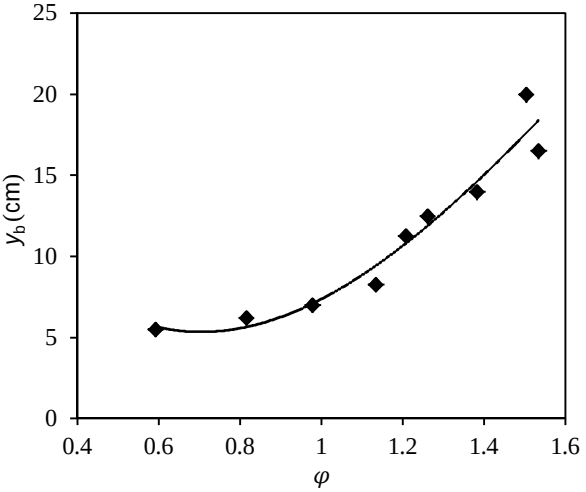
در این قسمت انواع شعله‌های پایدار شده توسط محیط متخلخل معرفی می‌شود. در ادامه اثر نسبت هم‌ارزی بر سرعت سوخت ورودی در چگالی حفره‌های مختلف برای انواع رژیم شعله بررسی شده و سپس محدوده‌ی پایداری در شعله پایدار شده مطالعه شده و با مشعل معمولی مقایسه می‌شود.

3-2-1- بررسی انواع شعله

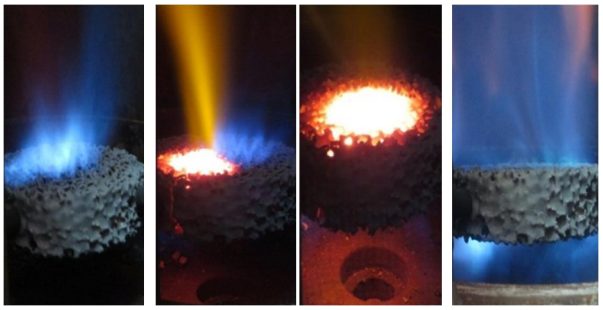
با توجه به مشاهدات در آزمایش‌ها، یک شعله پایدار شده توسط محیط متخلخل را می‌توان در چهار حالت تقسیم‌بندی کرد:

– حالت اول: برخورد شعله آزاد به محیط متخلخل
– حالت دوم: تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل
– حالت سوم: تشکیل شعله بیرون محیط متخلخل
– حالت چهارم: خروج کامل شعله از محیط متخلخل

شکل 8 تصاویری از حالات مختلف شعله را نشان می‌دهد. حالت اول زمانی حاصل می‌شود که شعله معمولی به محیط متخلخل برخورد می‌کند که نمودار حدود پایداری آن در قسمت قبل بیان شد. در این حالت محیط متخلخل نقش پایدارکننده اصلی را ندارد و لذا این حالت در این قسمت مورد بحث قرار نمی‌گیرد. شعله معمولاً پس از برخورد به محیط متخلخل از اطراف آن عبور می‌کند و در این حالت هیچ یک از سطوح محیط متخلخل گداخته نیستند که نشان می‌دهد فرایند احتراق در محیط متخلخل صورت نمی‌گیرد. در حالت دوم، با افزایش دبی هوا قسمتی از شعله به‌طور کامل به سطح زیرین محیط متخلخل چسبیده و قسمتی از آن داخل محیط متخلخل قرار می‌گیرد. در این حالت تمام محیط متخلخل گداخته بوده و هر دو سطح بالایی و پایینی آن تابش قابل ملاحظه‌ای دارند. حالت سوم زمانی به‌وجود می‌آید که با افزایش بیش‌تر دبی هوا، قسمتی از شعله از بالای محیط متخلخل خارج‌شده و بقیه شعله در داخل آن باقی می‌ماند. با توجه به مشاهدات، در بخش بالایی محیط متخلخل که شعله از آن خارج می‌شود، گداختگی محیط متخلخل از بین رفته ولی دیگر بخش‌های محیط متخلخل هم چنان گداخته می‌ماند.



شکل 7 نمودار ارتفاع برخاستگی بر حسب نسبت هم‌ارزی بر مرز پایداری



(الف) (ب) (ج) (د)

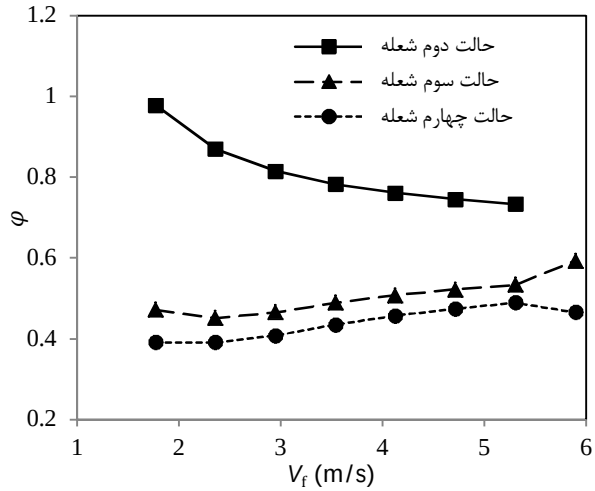
شکل 8 تصاویری از حالات مختلف شعله (الف) حالت اول (ب) حالت دوم (ج) حالت سوم (د) حالت چهارم

با افزایش بیش‌تر دبی هوا حالت چهارم رخ می‌دهد. در این حالت شعله کاملاً از محیط متخلخل خارج شده و روی سطح بالایی محیط متخلخل تشکیل می‌شود. در این حالت در هیچ یک از سطوح محیط متخلخل گداختگی دیده نمی‌شود.

3-2-2- بررسی اثر چگالی حفره

در این بخش به مطالعه‌ی اثر چگالی حفره بر مرز تشکیل انواع شعله پرداخته می‌شود. محیط متخلخل انتخاب‌شده از جنس کاربید سیلیسیم و دارای چگالی حفره‌های 10، 20 و 30 حفره در اینچ می‌باشند که در ارتفاع 5 سانتی‌متری از مشعل قرار گرفته‌اند.

مرز تشکیل در حالت اول شعله برای تمامی آزمایش‌ها مستقل از چگالی حفره است. شکل 9 مرز تشکیل انواع رژیم شعله را برای مشعلی متخلخل با چگالی حفره‌ی 10ppi بر حسب سرعت سوخت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شعله در نسبت هم ارزی کل کمتر از یک، در محیط متخلخل (حالت دوم) تشکیل شده است. با توجه به این شکل با افزایش سرعت سوخت شعله داخل محیط متخلخل در نسبت هم‌ارزی‌های کمتری تشکیل می‌شود. مرز تشکیل شعله در حالت‌های سوم و چهارم به‌ترتیب در نسبت هم‌ارزی‌های تقریبی 0/5 و 0/4 است. نتایج بیانگر این است که تشکیل شعله در حالت سوم و چهارم عمدتاً تابع نسبت هم ارزی است و تابع سرعت سوخت نیست. ناحیه‌ی بین شعله‌ی نوع دوم و سوم ناحیه‌ای است که در آن شعله داخل محیط متخلخل تشکیل می‌شود.



شکل 9 مرز تشکیل انواع رژیم شعله برای محیط متخلخل با چگالی حفره 10 ppi

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.5.47.1]

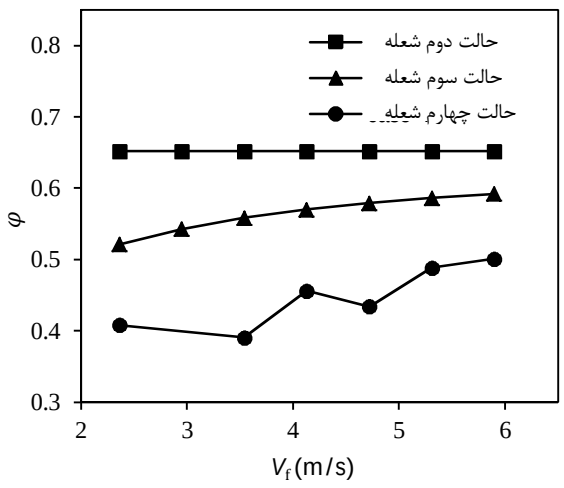
با توجه به شکل 9 مشاهده می‌شود که در بسیاری از نسبت‌های هم‌ارزی امکان تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل وجود دارد. البته این ناحیه با افزایش سرعت سوخت کوچک می‌شود. نسبت هم‌ارزی متوسط برای تشکیل شعله در سرعت‌های سوخت بررسی شده تقریبا برابر با 0/63 است. لازم به‌ذکر است که در مشعل متخلخل پیش آمیخته نیز تشکیل یک شعله پایدار داخل محیط متخلخل در همین نسبت هم‌ارزی روی می‌دهد [6].

نقش پایدارکننده محیط متخلخل به دو عامل مهم مربوط می‌شود. عامل اول کاهش سرعت مواد اولیه احتراق تا حد سرعت موضعی شعله و عامل دوم افزایش دمای مواد اولیه تا حد دمای اشتعال توسط محیط متخلخل داغ است. احتراق در محیط متخلخل شامل دو مکانیزم است، پیشگرم شدن واکنش‌گرها توسط محیط متخلخل تا دمای اشتعال (ناحیه پیشگرم در محیط متخلخل) و گرم شدن محیط متخلخل توسط محصولات احتراق (ناحیه احتراق) و نهایتاً انتقال حرارت از ناحیه احتراق به ناحیه پیشگرم محیط متخلخل با مکانیزم هدایت و تابش در محیط متخلخل [4]. تحلیل رفتار احتراقی در محیط متخلخل متضمن در نظر گرفتن این مکانیزم‌هاست. پیچیدگی تحلیل زمانی بیشتر می‌شود که شعله غیر پیش آمیخته باشد و نسبت هوا و سوخت در محیط متخلخل متغیر باشد. افزایش سرعت سوخت و کاهش نسبت هم ارزی به معنای افزایش سرعت جریان ورودی است. افزایش سرعت جریان ورودی موجب افزایش نرخ انتقال حرارت بین محیط متخلخل و جریان عبوری می‌شود که این امر عامل پایداری شعله در سرعت‌های بالای جریان ورودی است.

در شکل 10 منحنی تغییرات نسبت هم‌ارزی بر حسب سرعت سوخت برای حالت‌های مختلف شعله، در محیط متخلخل با چگالی حفره‌ی 20ppi ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، در محدوده‌ی $1/5m/s<V_f<6m/s$ تشکیل حالت‌های مختلف شعله در $\varphi>1$ روی می‌دهد. همچنین مرز تشکیل شعله داخل محیط متخلخل در نسبت هم‌ارزی ثابت 0/65صورت می‌گیرد و نسبت هم‌ارزی متوسط برای تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل 0/62 است.

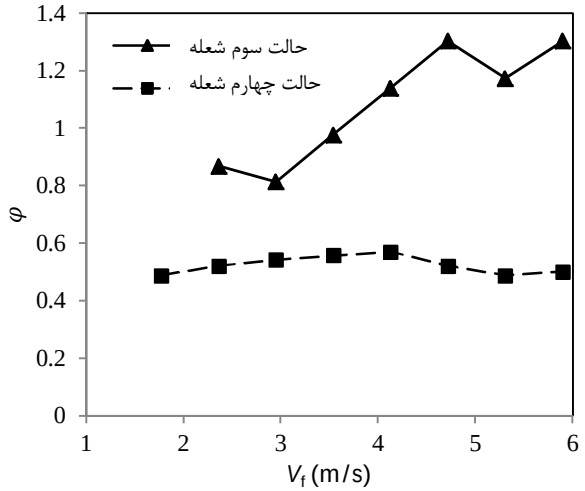
شکل 11 منحنی تغییرات نسبت هم‌ارزی بر حسب سرعت سوخت برای حالت‌های مختلف شعله، در محیط متخلخل با چگالی حفره‌ی ppi 30 را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در محدوده‌ی سرعت سوخت



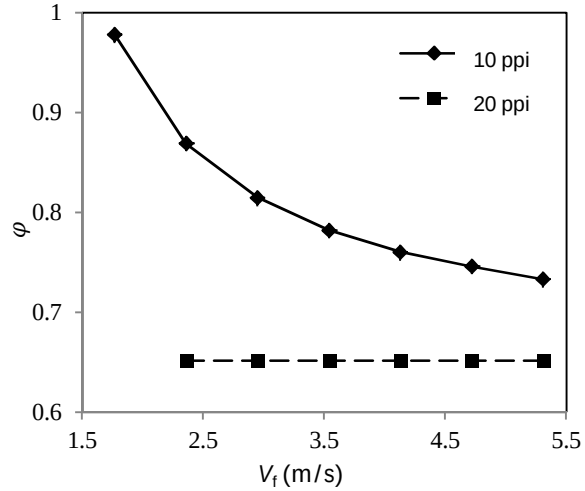
شکل 10 مرز تشکیل انواع رژیم شعله برای محیط متخلخل با ppi 20

$1/5m/s<V_f<6m/s$ شعله در حالت دوم تشکیل نمی‌شود. خروج کامل شعله از محیط متخلخل در نسبت هم‌ارزی 0/5 رخ می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است نسبت هم‌ارزی در مرز تشکیل شعله‌ی نوع سوم با افزایش سرعت سوخت افزایش می‌یابد و هم‌چنین محدوده‌ی ایجاد شعله‌ی نوع سوم با افزایش سرعت سوخت زیاد می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این قسمت، برای محیط‌های متخلخلی که امکان تشکیل شعله در حالت دوم برای آن‌ها وجود دارد، نسبت هم‌ارزی متوسط 0/63 است که برابر با نسبت هم‌ارزی تشکیل شعله پیش آمیخته در داخل محیط متخلخل است. هم‌چنین استفاده از محیط متخلخل با چگالی حفره‌ی کمتر امکان تشکیل شعله داخل محیط متخلخل را افزایش می‌دهد.

شکل 12 اثر نسبت هم‌ارزی بر حسب سرعت سوخت در چگالی‌های مختلف حفره را در لحظه تشکیل شعله داخل محیط متخلخل نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تشکیل شعله داخل محیط متخلخل برای تمامی چگالی حفره‌ها در محدوده‌ی مخلوط رقیق سوخت و هوا ($\varphi<1$) رخ می‌دهد. در چگالی حفره‌ی 10 نسبت هم‌ارزی در محدوده‌ی $0/9>\varphi>0/7$ با شیب ملایمی کاهش می‌یابد درحالی‌که در چگالی حفره‌ی 20 لحظه‌ی تشکیل شعله داخل محیط متخلخل در نسبت هم‌ارزی ثابت 0/65 رخ می‌دهد. شکل 12 نشان



شکل 11 مرز تشکیل انواع رژیم شعله برای محیط متخلخل با ppi 30



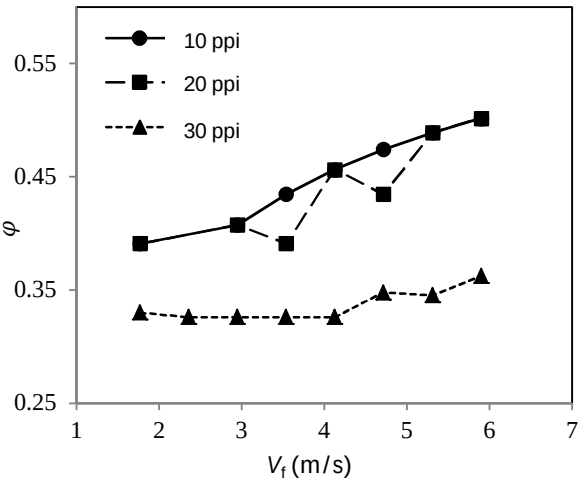
شکل 12 تغییرات نسبت هم‌ارزی بر حسب سرعت سوخت در چگالی حفره‌های مختلف در مرز تشکیل شعله‌ی داخل محیط متخلخل (حالت دوم شعله)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.5.47.1]

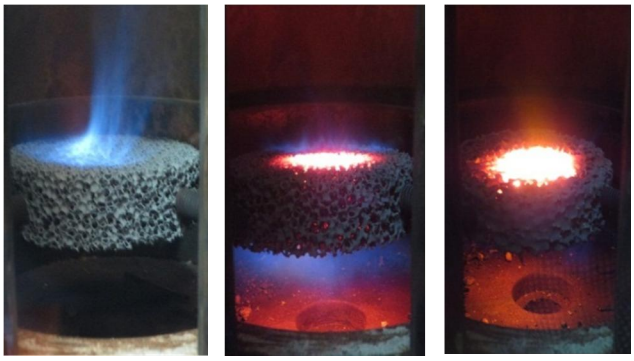
می‌دهد که با افزایش چگالی حفره، شعله داخل محیط متخلخل در نسبت هم‌ارزی‌های کمتری ایجاد می‌شود. این نتیجه به صورت حدی، منطقی است چون افزایش چگالی حفره به معنی کاهش قطر حفره‌ها و افزایش اثر محیط متخلخل است. این اثر به صورت کاهش سرعت جریان به علت کاهش قطر حفره‌ها ظاهر می‌شود. لذا رفتار چگالی حفره کمتر (10ppi) به رفتار پایداری شعله آزاد نزدیک‌تر است.

بررسی تغییرات نسبت هم‌ارزی بر حسب سرعت سوخت در چگالی حفره‌های مختلف در لحظه‌ی خروج کامل شعله از محیط متخلخل در شکل 13 نشان داده شده است. با توجه به شکل، خروج شعله از محیط متخلخل در تمامی چگالی حفره‌ها در بازه‌ی $0/33<\varphi<0/5$ اتفاق می‌افتد. در چگالی حفره ثابت با افزایش سرعت سوخت در بازه‌ی $1/5<V_f<6m/s$، نسبت هم‌ارزی تغییرات کمی دارد. با توجه به شکل با افزایش چگالی حفره خروج شعله از محیط متخلخل در نسبت‌های هم‌ارزی کمتری اتفاق می‌افتد. با افزایش نسبت هم ارزی کل به‌دلیل افزایش سرعت هوا سرعت جریان نیز افزایش می‌یابد. محیط متخلخل با چگالی حفره بزرگ‌تر، کاهش بیشتری در سرعت جریان ایجاد کرده که این امر به پایداری جریان کمک می‌نماید.

شکل 14 تصاویری از شعله‌های ایجاد شده را در نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 و سرعت سوخت ثابت 3/5m/s برای ارتفاع 5 سانتی‌متری محیط متخلخل از مشعل در چگالی حفره‌های مختلف، نشان می‌دهد. شکل (الف)، (ب) و (ج) به‌ترتیب مربوط به چگالی حفره 10، 20 و 30 می‌باشند.



شکل 13 بررسی نسبت هم‌ارزی در چگالی حفره‌های مختلف در لحظه‌ی خروج کامل شعله از محیط متخلخل (حالت چهارم شعله)



(ج) (ب) (الف)

شکل 14 تصاویری از انواع رژیم شعله در نسبت هم‌ارزی $\varphi=0/5$ در سرعت سوخت $V_f=3/5m/s$ در چگالی حفره‌های (الف) 10 ppi، (ب) 20ppi و (ج) 30ppi

همان طور که در تصاویر مشخص است، در این نسبت هم‌ارزی افزایش چگالی حفره سبب خارج شدن کامل شعله از محیط متخلخل می‌شود.

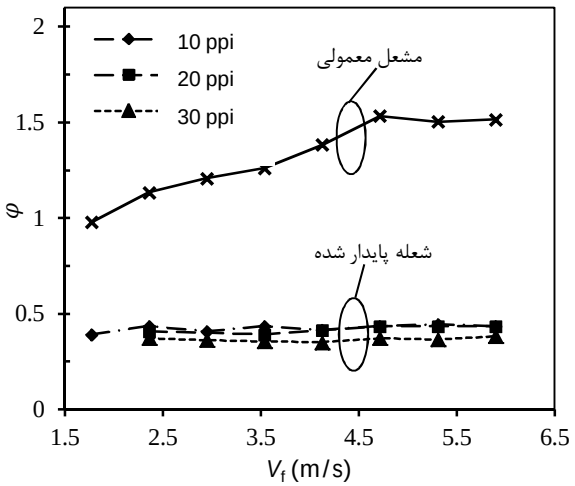
3-2-3- بررسی مرز پایداری شعله

در این بخش اثر چگالی حفره و فاصله‌ی محیط متخلخل روی مرز پایداری شعله بررسی شده و در ادامه محدوده‌ی پایداری در دو مشعل معمولی و پایدارشده مقایسه می‌شود.

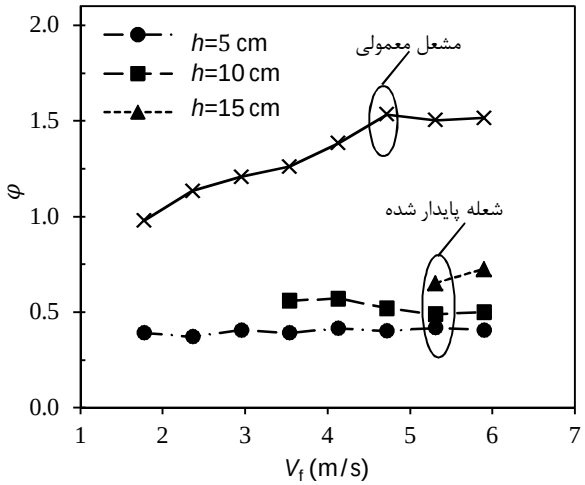
تغییرات مرز پایداری در چگالی حفره‌های مختلف برای ارتفاع 5 سانتی‌متری محیط متخلخل از مشعل در شکل 15 نشان داده شده است.

با توجه به شکل 15 مرز پایداری برای یک شعله پایدار شده در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از 0/5 است. صورتی که در شعله معمولی مقادیر نسبت هم‌ارزی در محدوده‌ی $1/6<\varphi<1$ تغییر می‌کند. تغییر چگالی حفره در یک شعله پایدار شده بر مرز پایداری تأثیر چندانی ندارد، در نتیجه می‌توان مرز پایداری را مستقل از چگالی حفره در نظر گرفت.

شکل 16 مرز پایداری در شعله معمولی و یک شعله پایدار شده در فواصل مختلف محیط متخلخل با چگالی حفره‌ی 10ppi از مشعل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با کاهش ارتفاع محیط متخلخل از مشعل، پایداری شعله در نسبت هم‌ارزی‌های کمتری ایجاد و در نتیجه باعث افزایش



شکل 15 بررسی تغییرات مرز پایداری در چگالی حفره‌های مختلف در ارتفاع 5cm محیط متخلخل از مشعل



شکل 16 مرز پایداری در شعله معمولی و شعله پایدار شده در ارتفاع‌های مختلف برای مشعل با چگالی حفره‌ی 10 ppi

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.5.47.1]

محدوده‌ی پایداری شعله می‌شود. با افزایش ارتفاع محیط متخلخل از مشعل پایداری شعله در سرعت‌های بالای سوخت امکان پذیر است. با مقایسه‌ی مرز پایداری در مشعل معمولی و پایدارشده، مشخص می‌شود که حتی در بالاترین ارتفاع محیط متخلخل از مشعل، مرز پایداری در نسبت هم‌ارزی‌های کمتری برای یک شعله پایدار شده نسبت به شعله معمولی قرار دارد.

4- بررسی خطا در داده‌های آزمایشگاهی

4-1- عدم قطعیت و بررسی خطا

روش‌های مختلفی برای تعیین اندازه خطا وجود دارد. هولمن [28] روشی مناسب برای تخمین دقت نتایج تجربی ارائه کرده است. در این روش، اگر R کمیتی باشد که عدم قطعیت آن مدنظر است، بایستی آن را برحسب کمیت‌های مستقل اندازه‌گیری شده، بیان نمود. چنان چه W_R عدم قطعیت کمیت وابسته‌ی مورد نظر بوده و w_1 تا w_n عدم قطعیت کمیت‌های مستقل x_1 تا x_n باشد، مقدار W_R با استفاده از رابطه (3) به‌دست می‌آید.

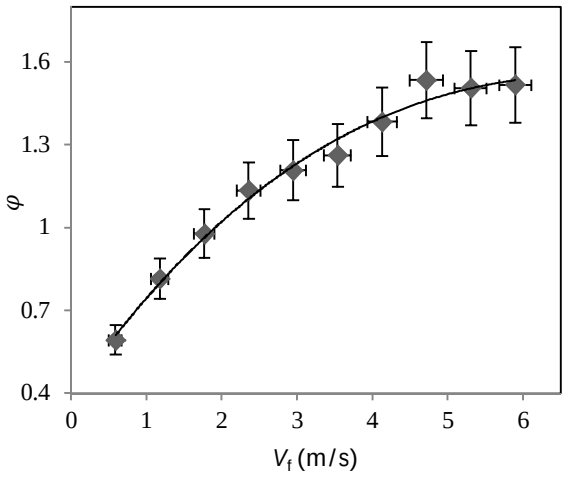
$$W_R = \left(\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \times w_1\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \times w_n\right)^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

فرض شده است که عدم قطعیت مربوط به ارزش حرارتی گاز و ابعاد ناچیز باشد. با توجه به نتایج اصلی موجود در این تحقیق، کمیت‌های متأثر از خطا، نسبت هم‌ارزی، سرعت سوخت، سرعت هوا، طول شعله و طول برخاستگی می‌باشند. با استفاده از رابطه‌های (1) و (3) عدم قطعیت نسبت هم‌ارزی، از رابطه (3) به‌دست می‌آید.

$$W_\varphi = \varphi \left(\left(\frac{1}{Q_f} \times w_{Q_f}\right)^2 + \left(\frac{1}{Q_a} \times w_{Q_a}\right)^2 \right)^{0.5} \quad (4)$$

بنابراین عدم قطعیت مربوط به نسبت هم‌ارزی با جایگذاری مقدار دبی هوا و دبی گاز بر اساس واحدهای تعیین شده و نیز مقدار نسبت هم‌ارزی در آن دو دبی به‌دست می‌آید.

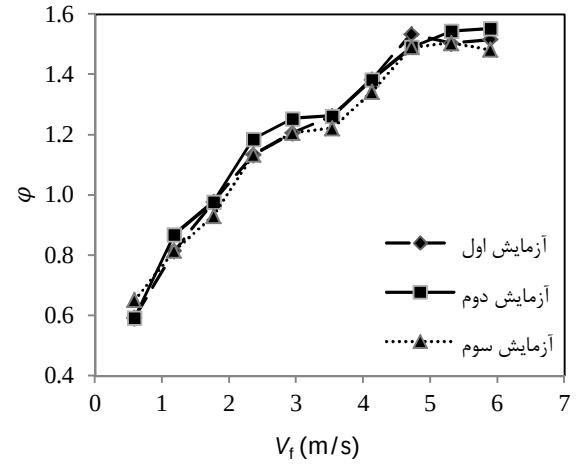
شکل 17 اندازه عدم قطعیت سرعت سوخت ورودی و نسبت هم‌ارزی روی مرز پایداری را روی مرز پایداری نشان می‌دهد. همان طور که در شکل نیز مشخص است با در نظر گرفتن خطاهای موجود، مرز پایداری رسم شده در محدوده‌ی قابل قبولی بوده و نتایج معتبر است.



شکل 17 اندازه عدم قطعیت سرعت سوخت ورودی و نسبت هم‌ارزی روی مرز پایداری

4-2- تکرار پذیری

آزمایش‌ها، برای اطمینان از عدم ورود خطاهای ناخواسته چندین بار تکرار می‌شوند. به‌طور نمونه، تکرار آزمایش‌های مربوط به شعله معمولی برای دستیابی به محدوده‌ی پایداری در نسبت هم ارزی‌های مختلف و در سرعت سوخت‌های متعدد در شکل 18 نشان داده شده است. با توجه به شکل تغییرات نسبت هم‌ارزی در سه تکرار نسبت به یکدیگر اختلاف چندانی ندارند، در نتیجه آزمایش‌ها به لحاظ تکرار پذیری دقت مناسبی دارند.



شکل 18 نمودار تکرار پذیری نسبت هم‌ارزی بر حسب سرعت سوخت روی مرز پایداری در مشعل معمولی

5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به‌صورت آزمایشگاهی، پایدارسازی شعله غیر پیش آمیخته به‌کمک محیط متخلخل بررسی شد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که:

1. در شعله پایدار شده غیرپیش‌آمیخته تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل در متوسط نسبت هم‌ارزی 0/63 می‌باشد که تقریبا با نسبت هم‌ارزی تشکیل شعله داخل محیط متخلخل در شعله پایدار شده پیش آمیخته برابر می‌باشد.
2. افزایش چگالی حفره سبب تشکیل شعله داخل محیط متخلخل و خروج آن از محیط متخلخل در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر می‌شود.
3. مرز پایداری در شعله پایدار شده مستقل از چگالی حفره است. هم‌چنین افزایش فاصله‌ی محیط متخلخل از مشعل سبب می‌شود در نسبت‌های هم‌ارزی بزرگتری مرز پایداری ایجاد شود.
4. مرز پایداری شعله در شعله پایدار شده در تمامی حالات در مخلوط‌های رقیق از سوخت و هوا ایجاد می‌شود درحالی‌که در شعله معمولی مرز پایداری در مخلوط‌های غنی به وجود می‌آید.

6- فهرست علائم

A_{air}	سطح مقطع ورودی هوای مشعل (cm^2)
A_f	سطح مقطع ورودی سوخت مشعل (cm^2)
A/F	نسبت دبی جرمی هوا به دبی جرمی سوخت
F/A	نسبت دبی جرمی سوخت به دبی جرمی هوا
H	فاصله‌ی محیط متخلخل از مشعل (cm)
L_f	طول شعله (cm)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.5.47.1]

ppi	حفره در اینچ
Q_{air}	دبی حجمی هوا (m^3/s)
Q_f	دبی حجمی سوخت (m^3/s)
V	حجم (m^3)
V_f	سرعت شعله (m/s)
W	عدم قطعیت متغیر اندازه‌گیری شده‌ی وابسته
w	عدم قطعیت متغیر اندازه‌گیری شده‌ی مستقل
X	متغیر مستقل
y_b	ارتفاع برخاستگی شعله (cm)
P	چگالی (kg/m^3)
E	چگالی حفره محیط متخلخل
Φ	نسبت هم‌ارزی

7- مراجع

[1] G. De. Soete. "Stability and Propagation of Combustion Wave in Porous Media" *The Eleventh Symposium on Combustion,* pp. 959-966, 1966.
[2] C. Chafin, M. Koenig, R.D. Koeroghlian Matthews, M.J. Hall, S.P. Nichol and I.G. Lim, "Experimental Investigation of Premixed Combustion Within Highly Porous Media" *Proceeding ASME/JSME Thermal Engineering Joint conf.* pp. 219-224, 1991.
[3] S.B. Sathe, M.R. Kulkarni, R.E. Peck, T.W. Tong,An experimental and theoretical study of porous radiant burner performance, *Combustion,* Vol. 23, No. 1,1011-1018, 1991.
[4] J. R. Howell, M. J. Hall, J. L. Ellzey, Combustion of hydrocarbon fuelswithin porous inert media, *Progress in Energy and Combustion Science*,Vol. 22, No. 2, pp. 121-145, 1996.
[5] D .Trimis, K .Wawrzinek, J. Comput, Flame Stabilization of Highly Diffusive Gas Mixtures in Porous Inert Media, *Applied Mechanics,* Vol. 5, No. 2, pp. 367-381, 2004.
[6] B .J. Vogel, J. L. Ellzey, subadiabatic and superadiabatic performance of a two-section porous burner, *Combustion Science and Technology,* Vol. 177, pp. 1323–1338, 2005.
[7] S. Wood, A. T. Harris, Porous burners for lean-burn applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, pp. 667–684, 2008
[8] J. Charoensuk, A. Lapirattanakun, On flam stability, temperature distribution and burnout of air-staged porous media Combustor firing LPG with different porosity and excess air, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 3125-3141, 2001.
[9] K. Gosiewsk, A. Pawlaczyk, K. Warmuzinski, M. Jaschik, A study on thermal Combustion of lean methane–air mixtures: Simplified reaction mechanism and kinetic equations*, Chemical Engineering Journal,* Vol. 154, pp. 9–16, 2009.
[10] R.C. Catapan, A.A.M. Oliveira, M. Costa, Non-uniform velocity profile mechanism for flame stabilization in a porous radiant burner, *Experimental Thermal and Fluid Scencei,* Vol. 35, pp. 172–179, 2011.
[11] D. Wu, H. Liu, M. Xie, H. Liu, W. Sun, Experimental investigation on low velocity filtration Combustion in porous packed bed using gaseous and liquid fuels, *Experimental Thermal and Fluid Scencei,* Vol. 36, pp. 169–177, 2012.
[12] F. Avdic, M. Adzic, F. Durst, Small scale porous medium combustion system for heat production in households, *Applied* Energy, Vol. 87, pp. 2148-2155, 2010.
[13] A.A. Bakry, A. Al-Salaymeh, A.H. Al-Muhtaseb, A. Abu-Jrai, D. Trimis, Adiabatic premixed combustion in a gaseous fuel porous inert media under high pressure and temperature: Novel flame stabilization technique, *Fuel,* Vol. 65, pp. 158-166, 2010.
[14] A. A. Bakry, A. Al-Salaymeh, A.H. Al-Muhtaseb, A. Abu-Jrai, D. Trimis, Adiabatic premixed Combustion in a gaseous fuel porous inert media under high pressure and temperature, *Fuel,* Vol. 90, pp. 647–658, 2011.
[15] A. Matthew, T. Smucker,J. L. Ellzey, Computational and Experimental Study of A two-Section Porous Burner,*Combustion Science and Technology,* Vol. 176, pp.1171-1189, 2004.
[16] L. M. Timothy, V. Sadasivuni,K. A. Ajay,Investigation of a Miniature Combustor Using Porous Media Surface Stabilized Flame, *Combustion Science and Technology,* Vol. 179, pp. 1901–1922, 2007.
[17] S. A. Hashemi, M. H. Atoof, An experimental study of stability in porous media sic, *Fuel and combustion,* Vol. 2, No. 2, pp. 11–23, 1390. (In Persian)
[18] S. A. Hashemi, J. Amani, M. H. Atoof, Experimental study of the stability of the flame in porous sic, *Amirkabi mechanical engineering,* Vol. 43, No. 1, pp. 59–70, 1390. (In Persian)
[19] S. A. Hashemi, M. Nikfar, R. Motaghedifar, Experimental study of the effect of the firing rate and equivalence ratio on the performance of the porous burner Metal radiation, *Amirkabi mechanical engineering,* Vol. 44, No. 1, pp. 35–46, 1391. (In Persian)
[20] S. A. Hashemi, M. Nikfar, M. Ahhosseini, Numerical and experimental study of combined porous burner flame free and comparison with porous burners, *Fuel and combustion,* Vol. 5, No. 2, pp. 77–91, 1391. (In Persian)
[21] S. A. Hashemi, M. Nikfar, Experimental study of the stability of the flame in the intermetallic porous ceramic, *Journal Energy And Engineering Managment*, Vol. 3, No. 3, pp. 42–51, 1392. (In Persian)
[22] S. A. Hashemi, M. Dastmalchi, M. Nikfar, experimental Back flame phenomena in porous ceramic, *Amirkabi mechanical engineering,* In press. (In Persian)
[23] F .Douglas; C .Ruey,-D.Hung;, F. James, Blowout of nonpremixed flames: maximum coaxial air velocities achievable, with and without swirl. *Combustion and flame,* Vol. 86, No. 4, pp. 347-358, 1991.
[24] S. R. Turns, *An Introduction To Combustion: Concepts and Applications,* McGraw-Hill, pp. 505-506, 2000.
[25] F. Takahashi, and W. J. Schmoll, Lifting criteria of jet diffusion flames. *International on Combustion,* Vol. 23, No. 1, pp. 677-683, 1990.
[26] M. Karbassi, *Analytical And Experimental Studies Of The Stability Limits Of Nonpremixed Flames In A Co-Flowing,* PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Calgary, Alberta, 1997.
[27] I. Glassman, R. A. yetter, *combustion,* forth edition, pp. 305-320, Elsevier, 2008.
[28] P. Holman, *measurement methods in engineering,* translation M. Maleki, Pub Jihad University of Technology, Isfahan, 1990. (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.5.47.1]