



## مطالعه تجربی پایدارسازی شعله پیش‌آمیخته با محیط متخلخل اکسید آلومینیم

سید عبدالمهدی هاشمی، حسین کولک، علیرضا آقایی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۹ بهمن ۱۳۹۴  
بازنگری: ۴ اردیبهشت ۱۳۹۵  
پذیرش: ۹ خرداد ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۲۴ مرداد ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

احتراق  
پایداری شعله  
مشعل پیش‌آمیخته  
محیط متخلخل

**چکیده:** در این تحقیق پایدارسازی شعله پیش‌آمیخته به کمک محیط متخلخل، به صورت تجربی بررسی شده است. بدین منظور ابتدا سرعت شعله، نسبت هم‌ارزی و توان حرارتی در مرز پایداری شعله معمولی بررسی شده و سپس پایدارسازی شعله پیش‌آمیخته با محیط متخلخل مطالعه شده است. در شعله پایدار شده از محیط متخلخل سرامیکی اکسید آلومینوم با چگالی‌های حفره ۱۰، ۲۰ و ۳۰ حفره در اینچ و در فواصل ۵ و ۸ سانتی‌متری از مشعل استفاده شده است. با توجه به نتایج، مشاهده شد که مرز پایداری در شعله پایدار شده مستقل از چگالی حفره بوده و در تمامی شرایط بررسی شده در نسبت هم‌ارزی تقریبی ۰/۵۵ رخ می‌دهد. همچنین افزایش فاصله محیط متخلخل از مشعل سبب ایجاد مرز پایداری در نسبت‌های هم‌ارزی بیش‌تری می‌شود. مقدار آلاینده‌های تولیدی به فاصله و جنس محیط متخلخل بستگی دارد، به طوری که استفاده از محیط متخلخل نسبت به شعله معمولی مقدار آلاینده  $NO_x$  را کاهش و مقدار آلاینده CO را افزایش می‌دهد.

سیلیسیم<sup>۱</sup>، اکسید آلومینیم<sup>۲</sup> و زیرکونیا<sup>۳</sup> است. جنس الیاف فلزی از الیاف‌هایی مانند آهن، کروم، آلومینوم یا الیاف‌های نیکل بوده که مقاومت زیادی در برابر اکسید شدن در دماهای بالا دارند [۲۰۱]. در جدول ۱ خواص برخی مواد مورد استفاده در مشعل‌های متخلخل ارائه شده است.

جدول ۱: خواص مواد متخلخل [۲۰۱]

Table 1. Properties of porous materials

جنس ماده متخلخل	پیشینه دمای قابل تحمل °C	ضریب هدایت گرمایی $W.m^{-1}K^{-1}$	ضریب مقاومت در برابر شوک حرارتی
$Al_2O_3$	۱۷۰۰	۵-۳۰	متوسط
SiC	۱۶۰۰	۲۰-۱۵۰	خیلی خوب
ZR (جامد)	۲۳۰۰	۲-۵	خوب
فلزات آلیاژی	۱۲۵۰	۱۰-۲۸	عالی

احتراق در محیط متخلخل به طور جدی از دهه ۶۰ میلادی به بعد، مورد توجه قرار گرفته است. ایجاد اغتشاش در جریان احتراقی، اختلاط بهتر سوخت و هوا و بهبود مکانیزم احتراق در شعله‌های پیش‌آمیخته، از اهداف اولیه‌ی به کارگیری محیط‌های متخلخل در احتراق است. البته بعدها مزایای

### ۱- مقدمه

فن‌آوری مشعل‌های متخلخل به دلیل داشتن ویژگی‌های برجسته‌ای چون افزایش محدوده توان دینامیکی، کاهش تولید آلودگی، کاهش حجم دستگاه و کاهش تولید صدا و مواردی مشابه، در بسیاری از شاخه‌های صنعتی چون صنایع غذایی، نیروگاه‌ها و سامانه‌های گرمایش مکان‌های مسکونی و تجاری استفاده می‌شود [۱].

در مشعل‌های معمولی، انتقال حرارت عمدتاً از طریق جابه‌جایی توسط محصولات احتراق انجام می‌شود؛ درحالی‌که در مشعل‌های متخلخل، علاوه بر جابه‌جایی، انتقال حرارت تابشی نیز نقش بسیار عمده‌ای در انتقال حرارت مشعل ایفا می‌کند. اجسام متخلخل دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به گازها هستند. بنابراین به واسطه آن‌ها انتقال حرارت در خلاف جهت جریان مخلوط گاز از محصولات احتراق به مواد نسوخته، طی یک اختلاف دمای کوچک‌تری تا رسیدن به دمای اشتعال صورت می‌گیرد؛ در نتیجه طول ناحیه احتراق افزایش می‌یابد و این امر سرعت شعله و هم‌چنین محدوده شعله‌وری را افزایش می‌دهد.

عمده ترکیبات تشکیل‌دهنده محیط‌های متخلخل، سرامیک‌های پایدار شده یا الیاف فلزی هستند. مواد پایه سرامیک‌ها اغلب شامل کاربید

1 SiC  
2  $Al_2O_3$   
3  $ZrO_2$

فراوان آن‌ها باعث شد تا تحقیقات وسیع‌تر و بیشتری در این زمینه انجام شود. سوت [۳] 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 کم شدن اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد و سرعت انتشار شعله داخل محیط شنی حدود ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه است. همچنین او مدلی نیمه تجربی برای محاسبه سرعت شعله و تأثیر پیش‌گرمایش به‌وسیله هدایت حرارتی جامد ارائه نمود. کوتانی و تاکنو [۴] آزمایشی انجام دادند که در آن، احتراق پایدار حتی در نزدیکی نسبت هم‌ارزی ۰/۲ دیده شد. در این حالت سرعت شعله ۲۰ برابر شعله‌های آزاد به‌دست آمده ولی حدود شعله‌وری تغییری نداشته است. ساث و همکاران [۵] مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای مشعل تابشی با مخلوط متان و هوای رقیق و محیط متخلخل سرامیکی فومی آلومینا سیلیکات، انجام دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، یک نوع از شعله در نیمه‌ی پایینی محیط متخلخل و دیگری در لبه بالایی تشکیل می‌شود. چفین و همکاران [۶] آزمایش‌هایی برای تعیین میزان آلاینده‌ها در مشعل متخلخل انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که انتشار اکسیدهای نیتروژن در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا ۰/۹۵ در مشعل سرامیکی متخلخل کاهش می‌یابد. برنر و همکاران [۷] پایداری شعله در داخل محیط متخلخل را به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی نمودند. دستگاه آزمایشگاهی آن‌ها مشعلی با مقطع مستطیلی بود. یک میدل حرارتی در دیواره‌ی مشعل برای پایداری شعله در محلی خاص به‌کار گرفته شد. محیط متخلخل از ساختار لایه‌ای آلومینا و کاربید سیلیسیم ساخته شده بود. آن‌ها پروفیل دما و میزان آلاینده‌ها را در میدل اندازه‌گیری نموده و با نتایج عددی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش نسبت هم‌ارزی، دمای گاز و دمای جامد کاهش می‌یابد. وگل و الزی [۸] 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 ۱/۳ و ۱/۷، نوسان شعله مشاهده می‌شود. دیامانتیس و همکاران [۹] شعله پیش‌مخلوط را داخل محیط متخلخل مدل‌سازی کردند. مدل آن‌ها ساختار شعله را در محیط تک‌لایه و دولایه بررسی می‌کرد. آن‌ها مدل تابشی داخل محیط را بدون هیچ ساده‌سازی حل کردند. نتایج نشان داد که در شعله پایدار شده سطحی، سرعت کمتر از سرعت شعله آرام است. در مقابل در شعله‌های مدفون، سرعت شعله بیش از سرعت شعله آرام خواهد بود؛ بنابراین در شعله مدفون در یک نسبت هم‌ارزی، ضریب انتقال حرارت حجمی کمتر از شعله معمولی است. هاشمی و عطوف [۱۰] اثر تخلخل و ضخامت را بر عملکرد یک مشعل متخلخل فلزی به‌طور تجربی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در محیط‌های با تخلخل یکنواخت با افزایش ضخامت محیط، دمای سطح و راندمان تابشی مشعل کاهش می‌یابد. هاشمی و همکاران [۱۱]، به بررسی تجربی پایداری شعله در محیط متخلخل پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها تغییر چگالی حفره محیط متخلخل، در مقادیر نسبت هم‌ارزی

برای آستانه پایداری شعله برخاسته، تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند. هاشمی و همکاران [۱۲]، در مطالعه‌ای تجربی اثر نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی را بر عملکرد مشعل متخلخل فلزی تابشی بررسی نمودند. بیشترین دمای سطح در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از یک (۰/۷ تا ۱) بوده و راندمان تابشی مشعل با افزایش نرخ آتش کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای عددی و تجربی، هاشمی و همکاران [۱۳]، شعله پایدار شده متخلخل - شعله معمولی را بررسی نموده و به مقایسه آن با مشعل متخلخل پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها شعله پایدار شده متخلخل - شعله معمولی دارای بازده حرارتی بیشتر و تولید اکسید نیتروژن کمتر می‌باشد. هاشمی و همکاران [۱۴]، 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 پدیده برگشت شعله در محیط متخلخل سرامیکی تحقیق دیگری از هاشمی و همکاران [۱۵] است. بر اساس گزارش آن‌ها سرعت نفوذ شعله برای نسبت هم‌ارزی ۱/۰۶، با افزایش نرخ آتش کاهش می‌یابد. برای نسبت هم‌ارزی ۱/۸۶ سرعت نفوذ شعله ابتدا افزایش یافته و سپس به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد. هاشمی و همکاران [۱۶] مطالعه آزمایشگاهی روی پایداری شعله غیر پیش‌مخلوط مغشوش به کمک محیط متخلخل انجام دادند. در شعله پایدار شده از محیط متخلخل سرامیکی کاربید سیلیسیم با چگالی حفره ۱۰، ۲۰ و ۳۰ حفره در اینچ و در فواصل ۵ و ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری از مشعل استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که شعله معمولی در مخلوط‌های غنی تشکیل شده و با افزایش نسبت هم‌ارزی طول شعله افزایش می‌یابد؛ همچنین آن‌ها مشاهده کردند که در شعله پایدار شده با افزایش چگالی حفره امکان تشکیل شعله داخل محیط متخلخل افزایش می‌یابد. با توجه به آزمایش‌ها مشاهده شد که تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل در متوسط نسبت هم‌ارزی ۰/۶۳ می‌باشد.

با توجه به کاربردهای گسترده‌ی پایداری مشعل‌ها 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 پایداری این شعله‌های پیش‌آمیخته بسیار اهمیت دارد.

از آنجا که در تحقیق گذشته، پایداری شعله غیر پیش‌آمیخته به کمک محیط متخلخل مورد مطالعه قرار گرفته بود، در این تحقیق پایداری شعله پیش‌آمیخته به کمک محیط متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا شعله آزاد در مشعل پیش‌آمیخته معمولی مطالعه شده و سپس شعله پیش‌آمیخته پایدار شده با محیط متخلخل بررسی می‌شود. در مشعل شعله معمولی تأثیر سرعت مخلوط ورودی بر مرز پایداری شعله بررسی می‌شود. در بررسی شعله پایدار شده ابتدا انواع رژیم شعله ایجاد شده در آن معرفی می‌شود و سپس به مطالعه اثر چگالی حفره محیط متخلخل و ارتفاع آن از مشعل، بر مرز تشکیل شعله‌ها پرداخته می‌شود. در پایان مشعل‌های معمولی و متخلخل از نظر تولید آلاینده‌ها مقایسه می‌شوند.

## ۲- دستگاه آزمایش

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

به منظور تأمین هوای مورد نیاز برای احتراق از کمپرسوری با قابلیت فشرده کردن هوا تا ۱۰ بار استفاده شده است. برای کاهش و تثبیت فشار هوا، از یک تنظیم‌کننده 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 ۱ تا ۵/۵ متر مکعب بر ساعت را با دقت اندازه‌گیری ۰/۵ متر مکعب بر ساعت دارد. بیشینه دبی قابل اندازه‌گیری با روتامتر سوخت ۱۰ لیتر بر دقیقه بوده و دقت آن ۰/۲ لیتر بر دقیقه می‌باشد.

به منظور اندازه‌گیری غلظت و دمای گازهای خروجی دودکش از دستگاه testo350 M/XL ساخت شرکت تستو آلمان استفاده شده است که تصویر آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری غلظت  $\text{NO}_x$  را تا ۳۰۰۰ ppm و غلظت CO را تا ۱۰۰۰۰ ppm دارد. همچنین ترموکوپل موجود در این دستگاه قابلیت تحمل دما تا  $1200^\circ\text{C}$  را دارد.



Fig. 1. Testo (testo350M/XL) machine  
شکل ۱: دستگاه تستو (testo350M/XL)

برای انجام آزمایش‌ها یک مشعل ساده پیش‌آمیخته طراحی و ساخته شده است. طرح‌واره محفظه احتراق و پایه نگهدارنده در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. برای جلوگیری از نفوذ هوای اطراف به شعله، مشعل در داخل محفظه احتراق قرار داده شده است. محفظه احتراق استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۲۲ و ۱۰۰ سانتی‌متر است. برای مشاهده انواع رژیم شعله و عکس‌برداری از شعله، در جلوی محفظه احتراق، برشی به عرض و ارتفاع ۷ و ۹۰ سانتی‌متر ایجاد شد. برای جلوگیری از ورود هوا از محل برش خورده، از یک قاب شیشه‌ای استفاده شده و همچنین به کمک چسب مخصوص تمام محل‌های احتمالی نفوذ هوا به‌طور کامل مسدود شد. برای نگه داشتن

محیط متخلخل و نیز جابه‌جایی بهتر و دقیق‌تر آن نگه‌دارنده‌ای ساخته شده و محیط متخلخل روی آن قرار داده شد. نگه‌دارنده به کمک چرخ‌دنده‌هایی قابلیت حرکت در راستای طولی و شعاعی را دارا می‌باشد. با توجه به گام چرخ‌دنده‌ها، دقت جابه‌جایی محیط متخلخل در این دستگاه برای هر دو راستا تقریباً برابر با ۱ میلی‌متر است.

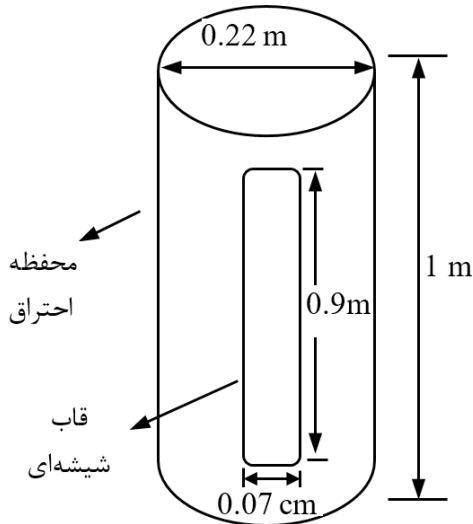


Fig. 2. The combustor  
شکل ۲: محفظه احتراق

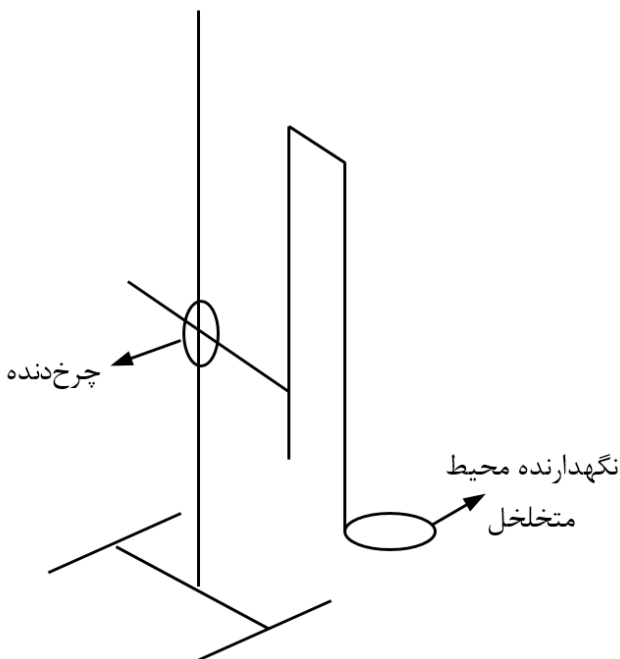


Fig. 3. Conservator of porous media  
شکل ۳: نگه‌دارنده محیط متخلخل

در مشعل، از محیط متخلخل سرامیکی از جنس اکسید آلومینیم و به شکل استوانه، با قطر ۹۰ و ارتفاع ۲۲ میلی‌متر و چگالی‌های حفره ۱۰ ppm و ۲۰ ppm و ۳۰ ppm، استفاده شده است.

### ۳- نتایج

نتایج در دو بخش ارائه می‌شوند. در بخش اول کمیت‌های سرعت شعله و توان حرارتی بررسی می‌شود. در بخش دوم شعله پیش مخلوط پایدار شده با محیط متخلخل بررسی می‌شود و انواع رژیم‌های شعله به وجود آمده 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. پس از آن مرز پایداری شعله در مشعل شعله معمولی و متخلخل مقایسه می‌شود. پارامترهای استفاده شده برای بررسی پایداری مشابه برخی تحقیقات گذشته نظیر [۱۷] می‌باشد.

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 مبنای جرمی و یا مولی بیان شده و از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\phi = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)}{\left(\frac{F}{A}\right)_{Stoic}} \quad (1)$$

برای محاسبه سرعت سوخت و هوای وارد شده به محفظه احتراق از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$V_{mix} = \frac{Q_{mix}}{A_{burner}} \quad (2)$$

سطح مقطع مشعل  $A_{burner} = 1.776 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  می‌باشد. در این مطالعه از چگالی‌های حفره ۱۰، ۲۰ و ۳۰ حفره در اینج (۴، ۸ و ۱۲ حفره در سانتی‌متر) استفاده شده است. از  $\varepsilon$  برای مشخص کردن تخلخل حفره محیط متخلخل استفاده می‌شود.

توان حرارتی عبارت است از ارزش حرارتی سوخت در دبی حجمی آن که به فرم زیر نوشته می‌شود.

$$PW = LHV \times Q_f \quad (3)$$

که در آن  $LHV$  ارزش حرارتی گاز طبیعی و  $Q_f$  دبی حجمی سوخت می‌باشد.

#### ۳-۱- مشعل پیش‌آمیخته معمولی

در این بخش تاثیر سرعت شعله بر محدوده پایداری شعله پیش‌آمیخته معمولی بررسی 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 [۱۸]. نمودار سرعت شعله بر حسب نسبت هم‌ارزی در مرز پایداری در شکل ۴ نشان داده شده است. برای محاسبه سرعت شعله از رابطه (۴) استفاده می‌شود [۱۹].

$$S_L = V_{mix} \frac{d}{L_f} \quad (4)$$

در اینجا  $d$  قطر دهانه مشعل و  $L_f$  طول شعله می‌باشد. برای یافتن طول شعله از محفظه شیشه‌ای دستگاه آزمایش به‌طور دقیق عکس‌برداری شده است. با افزایش نسبت هم‌ارزی، سرعت شعله زیاد می‌شود و در نسبت هم‌ارزی  $\phi=1/1$  به بیشترین مقدار خودش یعنی  $S_L=36 \text{ cm/s}$  می‌رسد که با  $S_L=37 \text{ cm/s}$  که در مراجع ذکر شده است اختلاف زیادی ندارد [۱۹]. در قسمت دوم نمودار با افزایش نسبت هم‌ارزی سرعت شعله کاهش می‌یابد و در نهایت در نسبت هم‌ارزی  $\phi=1/63$  شعله خاموش می‌شود.

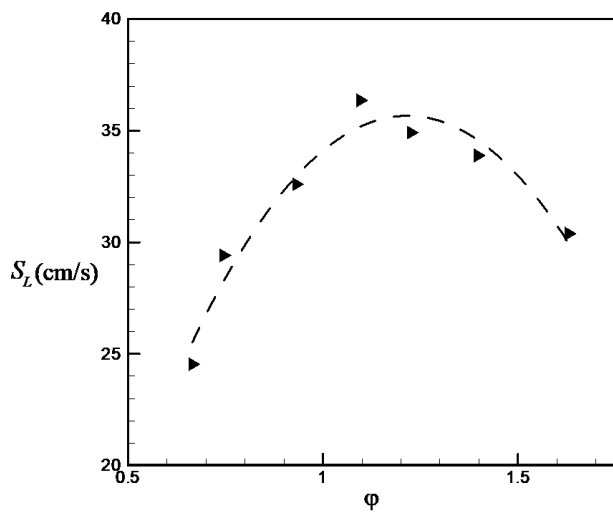


Fig. 4. Speed flame vs. equivalence ratio

#### شکل ۴: نمودار سرعت شعله بر حسب نسبت هم‌ارزی در مرز پایداری

شکل ۵ سرعت مخلوط ورودی بر حسب تغییرات توان حرارتی مشعل را نشان می‌دهد. با افزایش توان حرارتی در محدوده  $3/2 \text{ kW} < PW < 0/4 \text{ kW}$  سرعت مخلوط افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت مخلوط سوخت و هوای از شیب منحنی کاسته می‌شود و در سرعت مخلوط ورودی  $5 \text{ m/s}$  شیب نمودار صفر شده و توان حرارتی مشعل به بیشینه مقدار خود (کیلووات  $PW=3/2$ ) می‌رسد.

#### ۳-۲- مشعل پیش‌آمیخته متخلخل

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

#### ۳-۲-۱- انواع شعله تشکیل شده در محیط متخلخل

با توجه به مشاهدات در آزمایش‌ها، چهار نوع شعله در محیط متخلخل تشکیل می‌شود که در شکل ۶ تصاویری از این چهار شعله نشان داده شده

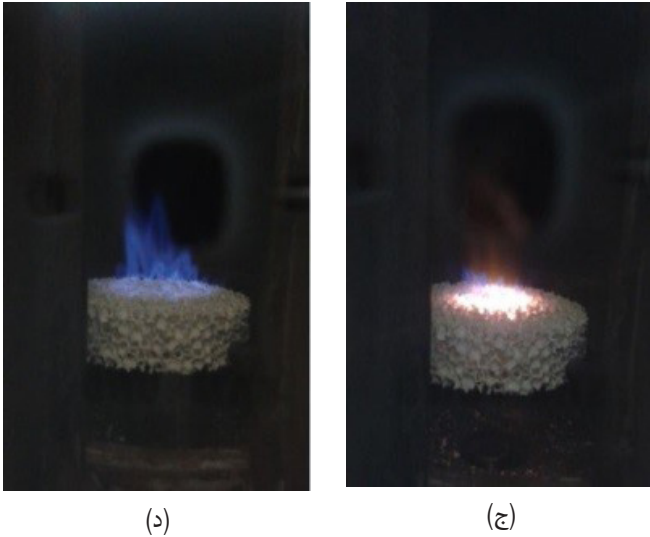


Fig. 6. Types of flames in porous media (a) case1 (b) case2 (c) case3 (d) case4

شکل ۶: تصاویری از حالات مختلف شعله (الف) حالت اول (ب) حالت دوم (ج) حالت سوم (د) حالت چهارم

### ۳-۲-۲- بررسی اثر چگالی حفره

در این بخش اثر چگالی حفره بر مرز تشکیل انواع شعله مطالعه می‌شود. محیط متخلخل انتخاب شده از جنس اکسید آلومینیوم و دارای چگالی حفره‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ حفره در اینچ می‌باشند که در ارتفاع ۵ سانتی‌متری از مشعل قرار گرفته‌اند.

شکل ۷ مرز تشکیل انواع رژیم شعله را برای مشعلی متخلخل با چگالی حفره‌ی  $\epsilon=10$  بر حسب سرعت مخلوط ورودی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش سرعت مخلوط ورودی انواع شعله در نسبت هم‌ارزی بالاتری تشکیل می‌شوند.

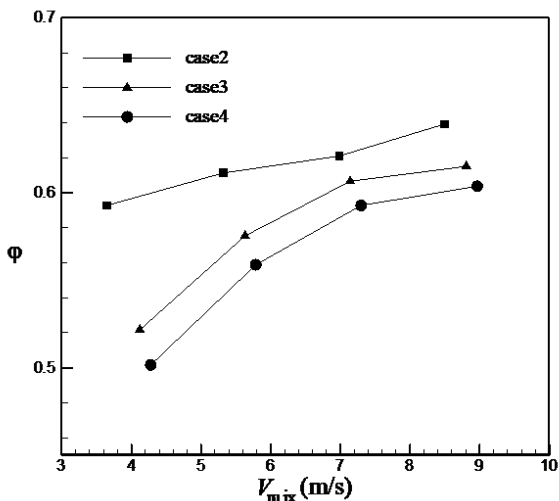


Fig. 7. Boundary of types of flame at porous media with  $\epsilon=10$  and height  $h=5$  cm of burner

شکل ۷: مرز تشکیل انواع شعله برای مشعل متخلخلی با چگالی حفره‌ی  $\epsilon=10$  و ارتفاع  $h=5$  cm محیط متخلخل از مشعل

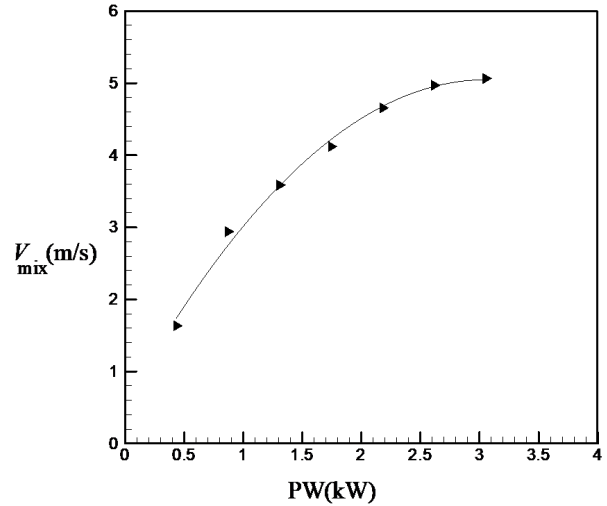


Fig. 5. Thermal power vs. velocity of mixture

شکل ۵: توان حرارتی بر حسب سرعت مخلوط ورودی

است. تصویر (۶-الف) شعله برخوردی به محیط متخلخل را نشان می‌دهد که این نوع شعله زمانی حاصل می‌شود که شعله معمولی به محیط متخلخل برخورد می‌کند. در این حالت محیط متخلخل نقش پایدار کننده ندارد. در تصویر (۶-ب) شعله نوع دوم مشاهده می‌شود. در این حالت شعله کاملاً به محیط متخلخل چسبیده است و تمام محیط متخلخل در ناحیه شعله گداخته بوده و هر دو سطح بالایی و زیرین محیط متخلخل تابش قابل ملاحظه‌ای دارند. با افزایش بیشتر دبی هوای موجود در مخلوط، شعله نوع سوم که در تصویر (۶-ج) ارائه شده است، مشاهده می‌شود. با توجه به مشاهدات، قسمتی از شعله از بالای محیط متخلخل خارج شده و بقیه شعله در داخل آن باقی می‌ماند. در بخشی از محیط متخلخل که شعله از آن خارج می‌شود، گداختگی محیط متخلخل از بین رفته ولی بخش دیگر محیط متخلخل هم چنان گداخته می‌ماند. شعله نوع چهارم به صورت خروج کامل شعله از محیط متخلخل و تشکیل آن روی سطح بالایی است که در تصویر (۶-د) نشان داده شده است. در این حالت هیچ‌کدام از سطوح محیط متخلخل گداخته نیستند.



(ب)

(الف)



سانتی متری محیط متخلخل از مشعل انجام شده‌اند و نتایج فقط برای حالت دوم و چهارم شعله ارائه شده است.

شکل ۱۰ مرز تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل برای مشعل متخلخلی با چگالی حفره ۱۰ و در فواصل مختلف محیط متخلخل از مشعل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در سرعت مخلوط ورودی ثابت با افزایش فاصله محیط متخلخل از مشعل، نسبت هم‌ارزی‌ای که در آن شعله داخل محیط متخلخل تشکیل می‌شود، افزایش می‌یابد. در ارتفاع  $h=8$  cm با افزایش سرعت مخلوط ورودی نسبت هم‌ارزی کاهش می‌یابد اما در ارتفاع  $h=5$  cm نسبت هم‌ارزی با افزایش سرعت مخلوط ورودی با شیب کمی زیاد می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت مخلوط ورودی نسبت‌های هم‌ارزی به مقدار  $\phi=0.65$  میل می‌کنند. ذکر این نکته نیز دارای اهمیت است که این همان نسبت هم‌ارزی است که شعله در یک مشعل متخلخل معمولی تشکیل می‌شود [۸].

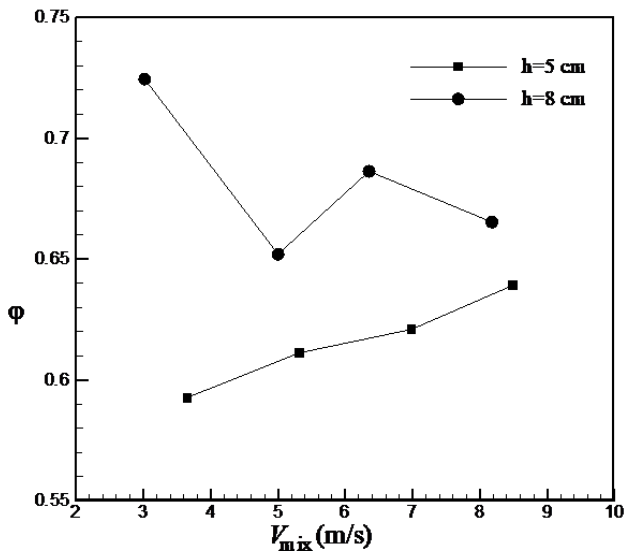


Fig. 10. Boundary of types of flame at porous media with  $\varepsilon=10$  and various heights of burner

شکل ۱۰: مرز تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل برای مشعل متخلخلی با چگالی حفره ۱۰ و در فواصل مختلف محیط متخلخل از مشعل

شکل ۱۱ تصاویری از شعله تشکیل شده در محیط متخلخل را در نسبت هم‌ارزی  $\phi=0.82$  برای مشعل با چگالی حفره ۱۰ در فواصل مختلف محیط متخلخل از مشعل نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات با افزایش ارتفاع محیط متخلخل از مشعل، شعله بیشتر وارد محیط متخلخل می‌شود.

۳-۳- آلاینده‌ها

در جدول ۲ تغییرات غلظت آلاینده‌های  $\text{CO}$  و  $\text{NO}_x$  در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف در مشعل شعله معمولی ارائه شده است. در جدول ۳ هم تغییرات غلظت این آلاینده‌ها را در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف، در چگالی حفره ۱۰ در فواصل ۵ cm و ۸ cm محیط متخلخل اکسید آلومینیوم

شکل ۸ اثر نسبت هم‌ارزی بر حسب سرعت مخلوط ورودی در چگالی حفره‌های مختلف برای لحظه تشکیل شعله داخل محیط متخلخل (حالت دوم) را نشان می‌دهد. با افزایش چگالی حفره، تشکیل شعله در نسبت هم‌ارزی‌های بالاتری اتفاق می‌افتد.

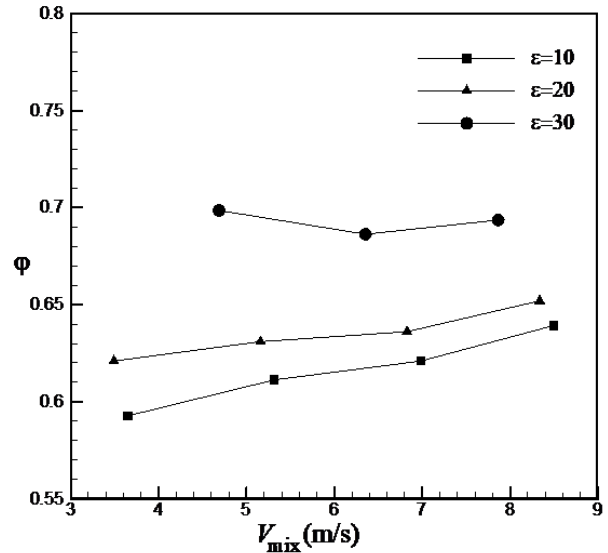


Fig. 8. Effect of velocity mixture on equivalence ratio at various porosities for case 2 of flame

شکل ۸: اثر نسبت هم‌ارزی بر حسب سرعت سوخت در چگالی حفره‌های مختلف برای لحظه تشکیل شعله داخل محیط متخلخل (حالت دوم)

شکل ۹ تصاویری از شعله‌های ایجاد شده در نسبت هم‌ارزی‌های  $\phi=0.82$  و  $\phi=1.00$  در ارتفاع ۵ سانتی متری محیط متخلخل از مشعل و در چگالی حفره ۱۰ می‌باشد.

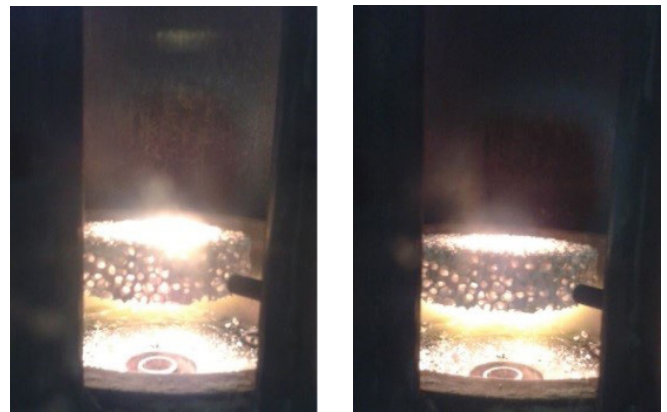


Fig. 9. Flames establishment at  $h=5$  cm and (a)  $\phi=0.82$  (b)  $\phi=1.00$

شکل ۹: تصاویری از شعله تشکیل شده در ارتفاع ۵ سانتی متری محیط متخلخل و در نسبت هم‌ارزی‌های (الف)  $\phi=0.82$  (ب)  $\phi=1.00$

۳-۲- بررسی اثر ارتفاع محیط متخلخل از مشعل

در این قسمت اثر ارتفاع محیط متخلخل از مشعل در مرز تشکیل شعله‌ها بررسی می‌شود. آزمایش‌ها در چگالی حفره ۱۰ و در دو ارتفاع ۵ و ۸

جدول ۲: بررسی مقادیر غلظت آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و  $\text{CO}$  و دمای گازهای خروجی برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف برای مشعل شعله معمولی

Table 2. Dopant of  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}$  at various equivalence ratios for ordinary burner

نسبت هم‌ارزی	غلظت $\text{NO}_x$ (ppm)	غلظت $\text{CO}$ (ppm)	دمای گازهای خروجی ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\phi = 1/0.9$	۱۵	۱۳	۲۰۴/۶
$\phi = 2/4.4$	۱۷	۵۴	۳۲۴/۷
$\phi = 1/6.3$	۱۵	۲۴	۳۳۷/۴
$\phi = 2/0.4$	۲۰	۴۶	۳۹۷/۵

جدول ۳: تغییرات غلظت آلاینده‌های  $\text{NO}_x$  و  $\text{CO}$  را نسبت هم‌ارزی‌های مختلف و در چگالی حفره‌ی ۱۰ در فواصل ۵ cm و ۸ cm محیط متخلخل اکسید آلومینیوم از مشعل

Table 3. Dopant of  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}$  at various equivalence ratio and in  $\epsilon=10$  and various heights

نسبت هم‌ارزی	ارتفاع محیط متخلخل (cm)	غلظت $\text{NO}_x$ (ppm)	غلظت $\text{CO}$ (ppm)	دمای گازهای خروجی ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\phi = 0/8.2$	$h = 5$	۹	۲۲۵	۱۷۵/۲
	$h = 8$	۸	۲۴۸	۲۳۳/۶
$\phi = 1/0.0$	$h = 5$	۱۳	۱۴۲	۲۲۴/۱
	$h = 8$	۵	۲۱۹	۲۲۸/۵

شعله برای مشعل با محیط‌های متخلخل اکسید آلومینیوم بررسی می‌شود. تغییرات مرز پایداری در چگالی حفره‌های مختلف برای ارتفاع ۵ cm محیط متخلخل اکسید آلومینیوم از دهانه مشعل متخلخل به همراه مشعل شعله معمولی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل، مرز پایداری شعله برای مشعل با محیط متخلخل از جنس اکسید آلومینیوم در نسبت‌های هم‌ارزی کوچک‌تر از ۰/۶ می‌باشد. محدوده شعله‌وری در محیط متخلخل اکسید آلومینیوم در بازه‌ی  $4 < V_{mix} < 9$  می‌باشد. در صورتی که در مشعل شعله معمولی مقادیر نسبت هم‌ارزی در محدوده  $0/66 < \phi < 1/63$  و محدوده شعله‌وری در بازه‌ی  $5/06 < V_{mix} < 1/63$  تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تغییر چگالی حفره در مشعل متخلخل اکسید آلومینیوم بر مرز پایداری تأثیری چندانی ندارد. شکل ۱۳ مرز پایداری شعله در مشعل شعله معمولی و مشعل متخلخل در فواصل مختلف محیط متخلخل از مشعل را نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده برای مشعل متخلخل با چگالی حفره‌ی ۱۰ می‌باشد. با توجه به شکل با کاهش ارتفاع محیط متخلخل از مشعل در هر دو نوع محیط متخلخل، پایداری شعله در نسبت هم‌ارزی‌های کمتری ایجاد شده که همین امر محدوده پایداری شعله را افزایش می‌دهد. با مقایسه مرز پایداری در مشعل شعله معمولی و مشعل متخلخل مشخص



Fig. 11. Flames establishment at  $\phi=0.82$  for burner by  $\epsilon=10$  and (a)  $h=5$  cm (b)  $h=8$  cm

شکل ۱۱: تصاویری از شعله تشکیل شده در محیط متخلخل در نسبت هم‌ارزی  $\phi=0/8.2$  برای مشعل با چگالی حفره‌ی ۱۰ در فواصل مختلف محیط متخلخل از مشعل (الف)  $h=5$  cm (ب)  $h=8$  cm

از مشعل نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج ارائه شده در مورد غلظت آلاینده‌های ناشی از احتراق، استفاده از محیط متخلخل در مشعل پیش‌آمیخته در مقایسه با مشعل شعله معمولی سبب کاهش غلظت  $\text{NO}_x$  تولیدی شده در حالی که مقادیر غلظت  $\text{CO}$  تولیدی بیشتر می‌باشد. همان‌طور که در جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، در مشعل شعله معمولی بیشترین مقدار غلظت آلاینده  $\text{NO}_x$  برای نسبت هم‌ارزی  $\phi = 2/0.4$  است که برابر با ۲۰ ppm و همچنین بیشترین  $\text{CO}$  نیز برابر با ۴۶ ppm برای همین نسبت هم‌ارزی است. برای مشعل متخلخل با بیشترین مقدار غلظت آلاینده  $\text{NO}_x$  برای نسبت هم‌ارزی  $\phi = 1/0.0$  است و در ارتفاع ۵ سانتی‌متری محیط متخلخل از دهانه‌ی مشعل برابر با ۱۳ ppm و کمترین مقدار آلاینده  $\text{NO}_x$  نیز برابر با ۵ ppm که در ارتفاع ۸ سانتی‌متری محیط متخلخل از دهانه‌ی مشعل می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود غلظت آلاینده  $\text{CO}$  در مشعل متخلخل بیشتر از مقدار این آلاینده در مشعل معمولی است. علت این امر این است که در واکنش احتراقی سوخت مورد استفاده در ابتدا به مونواکسیدکربن تجزیه می‌شود و اگر واکنش انرژی کافی داشته باشد، کربن مونواکسید تولیدی با اکسیژن موجود واکنش می‌دهد و کربن دی‌اکسید تولید می‌شود [۱۸]. در مشعل شعله معمولی، شعله انرژی کافی برای تبدیل مونواکسیدکربن به دی‌اکسیدکربن را دارد، در حالی که در مشعل متخلخل به واسطه تشکیل شعله داخل محیط متخلخل و اتلاف حرارت توسط محیط متخلخل و کاهش دمای محصولات احتراق این واکنش که در دمای بالا فعال است به خوبی انجام نشده که این امر سبب افزایش غلظت  $\text{CO}$  تولیدی در مشعل متخلخل می‌شود [۱۸].

۳-۴- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر محدوده پایداری شعله در این قسمت اثر چگالی حفره و فاصله محیط متخلخل بر مرز پایداری

کمیت وابسته‌ی مورد نظر بوده و  $w_i$  تا  $w_n$  عدم قطعیت کمیت‌های مستقل  $x_i$  تا  $x_n$  باشد، مقدار  $W_R$  با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$W_R = \left( \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \times w_1 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \times w_n \right)^2 \right)^{0.5} \quad (5)$$

در یک بررسی آزمایشگاهی سه نوع خطا ممکن است، رخ دهد. الف) خطای موجود در وسایل اندازه‌گیری، ب) خطای اندازه‌گیری که معمولاً ناشی از عدم دقت پژوهش‌گر است و ج) خطا در محاسبات. با توجه به ساده بودن معادلات به کار رفته و کم بودن حجم محاسبات، خطای ناشی از گرد کردن و عملیات محاسباتی اندک و قابل صرف نظر است.

خطاهای موجود در ابزارهای اندازه‌گیری با توجه به مشخصات ارائه شده عبارت است از:

خطای روتامتر گاز: ۰/۲ لیتر بر دقیقه

خطای روتامتر هوا: ۰/۵ مترمکعب بر ساعت

خطای ارزش حرارتی گاز طبیعی: ۳ درصد

با توجه به نتایج اصلی موجود در این تحقیق، کمیت‌های متأثر از خطا، نسبت هم‌ارزی، سرعت سوخت، سرعت هوا، توان حرارتی و طول شعله می‌باشند.

شکل ۱۴ اندازه عدم قطعیت سرعت مخلوط ورودی و نسبت هم‌ارزی را روی مرز پایداری نشان می‌دهد.

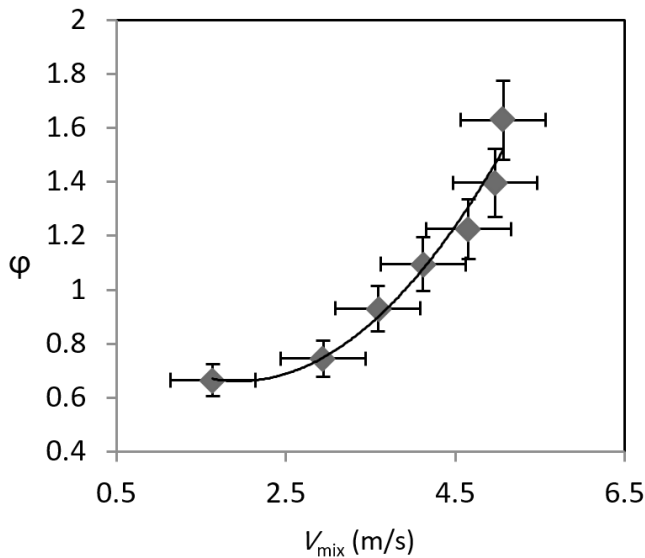


Fig. 14. Uncertainty in the experimental results

شکل ۱۴: اندازه عدم قطعیت در نتایج آزمایشگاهی

آزمایش‌ها، برای اطمینان از عدم ورود خطاهای ناخواسته چندین بار تکرار می‌شوند. به‌طور نمونه، تکرار آزمایش‌های مربوط به مشعل شعله معمولی برای دستیابی به محدوده پایداری در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف و در سرعت سوخت‌های متعدد در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به

می‌شود که حتی در بالاترین ارتفاع محیط متخلخل از مشعل باز مرز پایداری در نسبت هم‌ارزی‌های کمتری نسبت به مشعل شعله معمولی قرار دارد.

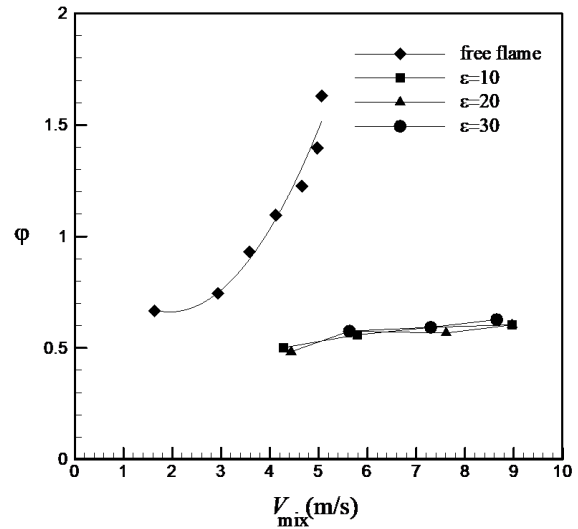


Fig. 12. Stable boundary at  $h=5$  cm and various porosities

شکل ۱۲: بررسی تغییرات مرز پایداری در چگالی حفره‌های مختلف و در ارتفاع ۵ cm محیط متخلخل اکسید آلومینیوم از مشعل

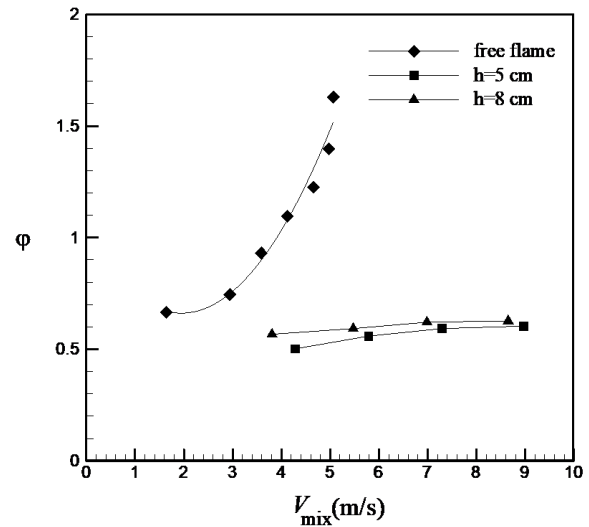


Fig. 13. Stable boundary with  $\epsilon=10$  and various height

شکل ۱۳: مرز پایداری در مشعل معمولی و مشعل متخلخل اکسید آلومینیوم در ارتفاع‌های مختلف برای مشعل با چگالی حفره‌ی ۱۰

#### ۴- بررسی خطا و تکرار پذیری در داده‌های آزمایشگاهی

روش‌های مختلفی برای تعیین اندازه خطا وجود دارد. هولمن [۲۰] روشی مناسب برای تخمین دقت نتایج تجربی ارائه کرده است. در این روش، اگر  $R$  کمیتی باشد که عدم قطعیت آن مدنظر است، باید آن را برحسب کمیت‌های مستقل اندازه‌گیری شده، بیان نمود. چنان چه  $W_R$  عدم قطعیت



نسبت دبی جرمی سوخت به دبی جرمی هوا	$F/A$
فاصله محیط متخلخل از مشعل (cm)	$h$
طول شعله (cm)	$L_f$
حفره در اینچ	$ppi$
سرعت شعله (cm/s)	$S_L$
دبی حجمی سوخت ( $m^3/s$ )	$Q_{mix}$
حجم ( $m^3$ )	$V$
سرعت مخلوط ورودی (m/s)	$V_{mix}$
عدم قطعیت متغیر اندازه‌گیری شده‌ی وابسته	$W$
عدم قطعیت متغیر اندازه‌گیری شده‌ی مستقل	$w$
متغیر مستقل	$X$
چگالی ( $kg/m^3$ )	$\rho$
چگالی حفره محیط متخلخل	$\varepsilon$
نسبت هم‌ارزی	$\phi$

شکل تغییرات نسبت هم‌ارزی در سه تکرار نسبت به یکدیگر اختلاف چندانی ندارند، در نتیجه آزمایش‌ها به لحاظ تکرارپذیری دقت مناسبی دارند.

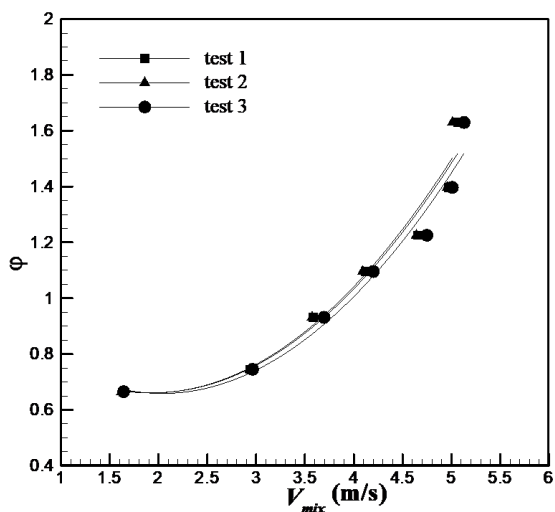


Fig. 15. Repetition at experiments for equivalence ratio vs. velocity of mixture on stable boundary

شکل ۱۵: تکرار پذیری نسبت هم‌ارزی بر حسب سرعت مخلوط ورودی روی مرز پایداری در مشعل شعله معمولی

#### منابع

- [1] S. Mossbauer, O. Pickenacker, K. Pickenacker, D. Trimis, Application of the porous burner technology in energy- and heat-engineering, *Clean Air*, 3(2) (2002) 185-198.
- [2] F.C. Christo, A parametric analysis of a coupled chemistry-radiation model in porous media, *DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION MELBOURNE (AUSTRALIA)*, 2000.
- [3] G.D. Soete, Stability and propagation of combustion wave in porous media, in: *The Eleventh Symposium on Combustion*, 1966, pp. 959-966.
- [4] Y. Kotani, T. Takeno, An experimental study on stability and combustion characteristics of an excess enthalpy flame, in: *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, 1982, pp. 1503-1509.
- [5] S. Sathe, M. Kulkarni, R. Peck, T. Tong, An experimental and theoretical study of porous radiant burner performance, in: *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, 1991, pp. 1011-1018.
- [6] C. Chaffin, M. Koenig, M. Koeroghlian, R.D. Matthews, M. Hall, I. Lim, S. Nichols, Experimental investigation of premixed combustion within highly porous media, in: *Proceedings of the 1991 ASME JSME thermal engineering joint conference*, 1991.
- [7] G. Brenner, K. Pickenäcker, O. Pickenäcker, D. Trimis, K. Wawrzinek, T. Weber, Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media, *Combustion and flame*, 123(1) (2000) 201-213.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به صورت آزمایشگاهی، پایداری سازی شعله پیش آمیخته به کمک محیط متخلخل بررسی شد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که در مشعل معمولی با افزایش نسبت هم‌ارزی، طول شعله افزایش می‌یابد. استفاده از محیط متخلخل اکسید آلومینیوم در مسیر شعله امکان تشکیل شعله در داخل محیط متخلخل با نسبت هم‌ارزی متوسط  $\phi=0/56$  برای تخلخل  $\varepsilon=10$  و نسبت هم‌ارزی  $\phi=0/59$  برای تخلخل  $\varepsilon=30$  را افزایش می‌دهد. با افزایش چگالی حفره تشکیل شعله داخل محیط متخلخل و خروج آن از محیط متخلخل در نسبت هم‌ارزی‌های بالاتری دیده می‌شود و مرز پایداری شعله در شعله پایدار شده مستقل از چگالی حفره بوده و در تمامی سرعت‌های مخلوط سوخت و هوای ورودی بررسی شده در نسبت هم‌ارزی تقریبی  $0/55$  رخ می‌دهد. هم‌چنین افزایش فاصله محیط متخلخل از مشعل موجب ایجاد مرز پایداری در نسبت‌های هم‌ارزی بیش‌تری می‌شود. استفاده از محیط متخلخل مقدار آلاینده  $NO_x$  را کاهش می‌دهد به گونه‌ای که در ارتفاع‌های بررسی شده‌ی محیط متخلخل از دهانه‌ی مشعل، مقدار آلاینده  $NO_x$  از مقدار این آلاینده در مشعل شعله معمولی کمتر است.

#### فهرست علائم

سطح مقطع ورودی مخلوط سوخت و هوا به مشعل ( $cm^2$ )	$A_b$
نسبت دبی جرمی هوا به دبی جرمی سوخت	$A/F$

- Journal Energy And Engineering Managment*, 3 (2013) 42–51
- [15] S.A.M. Hashemi, M. Nikfar, R. Motaghedifar, Experimental study of operating range and radiation efficiency of a metal porous burner, *Thermal science*, 19 (2015) 11-20.
- [16] S.A. Hashemi, E. Noori, A. Aghaei, Experimental study of a non-premixed turbulent flame stabilization with a porous medium, *Modares Mechanical Engineering*, 15 (2015) 341-349.
- [17] D. Feikema, R.-H. Chen, J.F. Driscoll, Blowout of nonpremixed flames: maximum coaxial air velocities achievable, with and without swirl, *Combustion and Flame*, 86(4) (1991) 347-358.
- [18] S.R. Turns, *An Introduction To Combustion: Concepts and Applications*, McGraw-Hill, (2000) 505-506.
- [19] A. Bonhomme, T. Boushaki, L. Selle, B. Ferret, T. poinsot, Institut de Mecanique des Fluides de Toulouse, (201).
- [20] P. Holman, *measurement methods in engineering, translation* M. Maleki, Pub Jihad University of Technology, Isfahan, (1990).
- [8] B.J. VOGEL, J.L. ELLZEY, Subadiabatic and superadiabatic performance of a two-section porous burner, *Combustion science and technology*, 177(7) (2005) 1323-1338.
- [9] D. Diamantis, E. Mastorakos, D. Goussis, Simulations of premixed combustion in porous media, *Combustion Theory and Modelling*, 6(3) (2002) 383-411.
- [10] S.A.M. Hashemi, H. Atoof, Experimental Study of the effect of thickness and porosity on porous metal radiant burner, *Fuel and combustion*, 2 (2009) 11-23.
- [11] S.A.M. Hashemi, H. Atoof, An experimental study of stability in porous media sic, *Fuel and combustion*, 2 (2011) 11–23.
- [12] S.A.M. Hashemi, J. Amani, H. Atoof, Experimental study of the stability of the flame in porous sic, *Amirkabir mechanical engineering*, 43 (2011) 59–70.
- [13] S.A.M. Hashemi, M. Nikfar, M. Khosravianhosseini, Numerical and experimental study of combined porous burner flame free and comparison with porous burners, *Fuel and combustion*, 5 (2012) 77–91.
- [14] S.A.M. Hashemi, M. Nikfar, Experimental study of the stability of the flame in the intermetallic porous ceramic,

Please cite this article using:

S. A. Hashemi, H. Kolak, A. Aghaei, "Experimental Study of Premixed Flames Stabilization with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Porous Media"

*Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(3) (2017) 625-634.

DOI: 10.22060/mej.2016.804

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

