

بررسی تجربی پایداری شعله و استخراج نقشه عملکردی یک مشعل متخلخل سازمان یافته سرامیکی در کاربرد پخت و پز

سعید محمدباقری^۱، محمد ضابطیان طرقي^{۲*}، محمدمهدی هیهات^۳، علی عاشوری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، m_saeed@modares.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، zabetian@modares.ac.ir

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، mmheyhat@modares.ac.ir

۴- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، Aliashouri@modares.ac.ir

* نویسنده مسئول

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۴)

چکیده: این مقاله به بررسی تجربی احتراق نیمه آمیخته در مشعل متخلخل سرامیکی سازمان یافته برای پخت و پز می پردازد. راندمان حرارتی، انتشار آلاینده، نرخ انتقال حرارت و نقشه عملکردی مشعل بررسی شده است. همچنین در تحلیل رفتار راندمان حرارتی، سهم نرخ انتقال حرارت جابه جایی و تشعشع تفکیک شده است. در این مطالعه، از ظروف آلومینیومی با ابعادی مطابق استاندارد ملی ایران در محدوده وسیعی از توان حرارتی در بازه ۹/۸۳-۱/۸۳ کیلووات و نسبت هم‌ارزی در محدوده ۱/۲-۰/۵ استفاده شده است. از گاز طبیعی به عنوان پرمصرف ترین و متداول ترین سوخت در اجاق گازهای خانگی به عنوان سوخت استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش نسبت هم‌ارزی از رقیق سوزی به غنی سوزی، شکل و رنگ شعله تغییر محسوسی می کند و شعله آبی رنگ به شعله زرد تشعشعی با طول بلندتر تبدیل می شود. بهترین نقطه کاری مشعل از جنبه بازده حرارتی دارای توان حرارتی ۱/۸۳ کیلووات و نسبت هم‌ارزی ۰/۷ است که میزان بازده حرارتی آن برابر ۵۸/۳۳٪ است. در این نقطه کاری، میزان انتشار آلاینده CO پایین تر از حد استاندارد ملی ایران است و میزان NO_x نیز در تمامی آزمون ها زیر 1ppm است.

کلمات کلیدی: احتراق نیمه آمیخته، مشعل محیط متخلخل، راندمان حرارتی، انتقال حرارت، نقشه پایداری

مقدمه

مطالعه بر روی بازده حرارتی و میزان آلاینده‌گی مشعل اجاق گاز خانگی همواره مورد توجه بوده است. جهت بهبود بازده احتراقی و حرارتی در مشعل های مورد استفاده در اجاق های خانگی، فناوری احتراق در محیط متخلخل طی چند دهه گذشته مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است. احتراق در مشعل های محیط متخلخل مزایای زیادی دارد که می توان به محدوده بالای ظرفیت مشعل، پایداری شعله، افزایش راندمان حرارتی بیشتر، تولید آلاینده CO و NO_x کمتر و احتراق ایمن اشاره کرد. احتراق در این مشعل ها معمولاً رقیق سوز است و در نتیجه، احتراق پایدار در نسبت هم‌ارزی های کمتر از یک نیز تشکیل می شود. به دلیل سطح جامد محیط متخلخل نسبت به مشعل شعله آزاد، انتقال حرارت بهتری در فاز گاز در کنار افزایش انتقال حرارت تابشی سطح جامد آن ایجاد می شود. این امر منجر به توزیع دمایی یکنواخت تری در سطح مشعل می شود که افزایش محدوده پایداری و کاهش میزان تولید آلاینده‌گی در این مشعل ها را به دنبال دارد.

چافین و همکاران [۱] در پژوهش تجربی خود، کاهش انتشار آلاینده NO_x را در محیط متخلخل سرامیکی و در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا ۰/۹۵ نشان دادند. در تحقیق هاول و همکاران [۲]، احتراق سوخت های فسیلی در یک محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفت که در آن به برخی از ویژگی های مانند رسانایی، بازده تشعشع، ضریب جابه جایی و برخی ویژگی های سیال یعنی سرعت و آشفتگی پرداختند. خان و همکاران [۳] در پژوهش خود از یک مشعل متخلخل سرامیکی دو لایه با هدف

بررسی تأثیر سرعت پیش مخلوط سوخت و هوا (متان و هوا) و نسبت هم ارزی بر دمای خروجی و انتشار آلاینده‌ها، استفاده کردند. آنها نشان دادند که انتشار آلاینده CO علاوه بر این که به محل شعله بستگی دارد با افزایش سرعت پیش مخلوط افزایش می‌یابد؛ زیرا غلظت وابسته به موقعیت شعله بوده و در سرعت‌های بالا، شعله در نزدیکی خروجی مشعل قرار می‌گیرد و زمان کافی برای تبدیل CO به CO₂ وجود نخواهد داشت.

تیرمیس و وارزینک [۴] پایداری شعله را در محیط متخلخل با انتشار مخلوط گازی زیاد بررسی کردند. نتایج آن‌ها به این صورت بود که برای مخلوط‌هایی با عدد لوئیس ۱ یا بالاتر، عدد پکلت باید ۶۵ باشد. با این حال، برای عدد لوئیس کمتر از ۱، عدد پکلت کاهش می‌یابد. در مطالعه تجربی دیگر باینویچ و همکاران [۵] پایداری یک مشعل متخلخل را با هدف تثبیت شعله بین دو بستر گلوله آلومینا مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که پایداری شعله در فصل مشترک محیط متخلخل اتفاق می‌افتد و در نسبت هم‌ارزی‌های ۰/۶ و ۰/۷ به ترتیب دمای ناحیه احتراق ۱۴۷۰K و ۱۶۷۰K است. کاربنسوک و لپیراتاناکون [۶] به بررسی پایداری شعله و توزیع دما در یک محیط متخلخل به طور آزمایشگاهی پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد هوای اضافی، دمای آدیاباتیک شعله کاهش و بیشینه دمای شعله ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

کاتاپان و همکاران [۷] به طور تجربی به بررسی پایداری شعله در مشعل تابشی متخلخل پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت هم‌ارزی دمای شعله افزایش می‌یابد و به ازای سرعت ورودی بالاتر شعله می‌تواند پایدار شود. در یک مطالعه آزمایشگاهی، وو و همکاران [۸] مشخصات احتراق پیش آمیخته در محیط متخلخل را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که دمای بیشینه احتراق و سرعت انتشار موج احتراقی با افزایش نسبت هم‌ارزی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. کرامیوتیس و همکاران [۹] بر روی مشعل متخلخل دو لایه‌ای از جنس اکسید آلومینیوم و فوم سیلیکون کاربید با سوخت متان و گاز مایع آزمایش جامع انجام دادند. هدف آنها بررسی راندمان حرارتی، انتشار آلاینده‌ها و تعیین محدوده عملکرد مشعل بود. نتایج آنها نشان دهنده توزیع یکنواخت دما، انتشار کم CO و NO_x و انعطاف‌پذیری بالای مشعل نسبت به سوخت ورودی و بارهای حرارتی بود. کرامیوتیس و فونتی [۱۰] در پژوهش تجربی پایداری و عملکرد مشعل متخلخل با سوخت بیوگاز را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که انتشار آلاینده CO در مخلوط سوخت ۶۰٪ متان و ۴۰٪ کربن دی‌اکسید در مقایسه با متان خالص، به مقدار ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

الطباء و همکاران [۱۱] مطالعه‌ای بر روی یک مشعل متخلخل متشکل از دو لایه اکسید آلومینیوم با تخلخل ۴۰٪ در ناحیه پیش‌گرم و با تخلخل ۶۰٪ در ناحیه احتراق انجام دادند. نتایج نشان داد که در نسبت هم‌ارزی بیشتر از ۰/۷۱، شعله در سطح مشترک دو لایه پایدار است. افزایش ضخامت ناحیه احتراق منجر به انتقال حرارت تابشی بیشتر و افزایش این مقدار از حد معینی هم‌زمان با افزایش سطح، باعث کاهش دمای مشعل می‌شود و شعله را به سمت پایین دست انتقال می‌دهد. انتشار CO با افزایش نسبت هم‌ارزی کاهش می‌یابد ولی NO_x در ضخامت‌های مختلف ناحیه احتراق در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰/۴۲ تا ۰/۷۱ ثابت باقی می‌ماند.

شکیبا و همکاران [۱۲] به طور تجربی بر روی اثر ویژگی‌های فیزیکی فوم سرامیکی مورد استفاده در ناحیه احتراق و تأثیر نوع و ساختار فوم بر عملکرد مشعل متخلخل سرامیکی بررسی انجام دادند. مشعل آنها از چهار بخش ناحیه پیش مخلوط، پیش‌گرم، احتراق و مجموعه مبدل حرارتی تشکیل شده بود. نتایج به این صورت بود که فوم‌های با میزان تخلخل کم با افزایش هوای اضافی، بازده حرارتی آن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد در حالی که در چگالی تخلخل زیاد این تغییرات زیاد نیست از طرفی با افزایش اندازه حفره‌های فوم، غلظت CO کاهش و با افزایش چگالی تخلخل، انتشار آلاینده CO و NO_x زیاد می‌شود. آنها همچنین با مقایسه اکسید آلومینیوم و فوم سیلیکون کاربید به این نتیجه رسیدند که فوم اکسید آلومینیوم NO_x کمتری تولید می‌کند.

در پژوهشی که قریشی و همکاران [۱۳] در زمینه انتشار آلاینده در مشعل ترکیبی متخلخل شعله آزاد انجام دادند و هدف آن‌ها بررسی و تحلیل اثر اندازه حفره در مرکز محیط متخلخل بود. نتیجه‌گیری آزمایش به این صورت بود که افزایش

قطر حفره محیط متخلخل، افزایش نرخ آتش و در محدوده نسبت هم ارزی ۰/۷۷-۰/۶۵ غلظت CO کاهش می‌یابد در حالی که افزایش چگالی حفرات محیط متخلخل و در محدوده نسبت هم ارزی ۰/۷۷-۰/۸۳ انتشار CO افزایش می‌یابد. تغییرات NO_x به طور قابل توجهی به نسبت هم‌ارزی وابسته است و با افزایش آن، NO_x تولیدی هم افزایش می‌یابد و همچنین استفاده از فوم Al_2O_3 انتشار CO را نسبت به SiC کاهش داد. چالک و همکاران [۱۴] با به کارگیری مشعل محیط متخلخل، طیف وسیعی از احتراق پایدار در توان‌های مختلف با پیش‌گرم کردن هوای ورودی ایجاد کردند. آنها با افزایش دمای شعله نسبت به دمای آدیاباتیک باعث کاهش مصرف انرژی تا حدود ۲۹٪ در مقایسه با مشعل‌های معمولی شد.

در مشعل‌های محیط متخلخل جهت مصارف پخت و پز نیاز به احتراق با راندمان حرارتی بالا و انتشار آلاینده‌گی کم است. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مشعل محیط متخلخل صورت گرفته است ولی مطالعات محدودی در استفاده از مشعل‌های متخلخل سرامیکی سازمان یافته و عملکرد آن در کاربرد پخت و پز انجام شده است.

از نمونه مطالعات انجام شده در کاربرد پخت و پز می‌توان به موتوکومار و شیامکومار [۱۵] اشاره کرد که به طور تجربی بازده حرارتی و انتشار آلاینده یک مشعل تابشی متخلخل با سوخت LPG را با توجه به آزمایش‌های استاندارد مورد بررسی قرار دادند. آنها با مقایسه سه تخلخل، بهترین راندمان را ۷۵٪ در نسبت هم‌ارزی و توان‌های مختلف برای بهینه‌سازی تخلخل گزارش کردند. همچنین انتشار آلاینده CO و NO_x را بسیار کمتر از انتشار در مشعل‌های معمولی شعله آزاد هند گزارش کردند. در پژوهش دیگر سلطانیان و همکاران [۱۶] بر روی مشعل محیط متخلخل از جنس سیلیکون کارباید و ناحیه پیش‌گرم از گوی‌های آلومینا مطالعه‌ای انجام دادند. آنها دریافتند که در محدوده نسبت هم‌ارزی ۱-۰/۹ و در محدوده توان حرارتی ۳۷/۷-۵/۵ شعله سطحی چسبیده به سطح سرمشعل می‌تواند نرخ انتقال حرارت تشعشعی را به طور قابل توجهی افزایش دهد و راندمان حرارتی مشعل را تا ۶۲٪ بالا ببرد. از این رو تحقیق حاضر ادامه پژوهش آن‌ها است.

در تحقیق حاضر، از یک جریان پیش‌آمیخته و مخلوط شده سوخت و هوا در یک مشعل محیط متخلخل سرامیکی سازمان یافته استفاده شده است. در این پژوهش عملکرد مشعل در توان‌های حرارتی و نسبت هم‌ارزی مختلف با هدف دستیابی به محدوده شعله پایدار و بیشینه راندمان مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد و شکل شعله تشکیل شده در مشعل محیط متخلخل در کاربرد پخت و پز خانگی تابعی از نسبت هم‌ارزی، سرعت جریان ورودی، فاصله مشعل تا قابلمه و میزان تخلخل مشعل است.

توضیحات بستر آزمون مشعل متخلخل پخت و پز خانگی

در بستر آزمون موردنظر، سوخت و هوا از دو خط اصلی گاز و هوا تغذیه می‌شوند و قبل از رسیدن به سرمشعل با یکدیگر ترکیب می‌شوند. دبی هوای ورودی برای کنترل بهتر و دقیق‌تر به ترتیب توسط روماتر (مدل ACA03 - 25) رصد می‌شود. خط هوا نیز از یک دمنده فشار گرفته می‌شود که نسبت هم‌ارزی مشعل با تنظیم دبی هوای ورودی تعیین می‌شود. در اندازه‌گیری میزان گاز مصرفی به جای دبی‌سنج از کنتور گاز (GS - 84 - 04C) به دلیل قابلیت افزایش دقت در اندازه‌گیری استفاده شده است. بنابراین، در توان‌های حرارتی مختلف می‌توان دبی سوخت را با دقت یکسان در نظر گرفت. با توجه به سوخت متداول اجاق گازهای خانگی که گاز طبیعی است، در این تحقیق از گاز طبیعی با درصد متان ۹۴/۲٪ استفاده شده است. برای اختلاط هر چه بهتر سوخت و هوا که منجر به احتراق کامل می‌شود، مسیر بعد از اختلاط، مسیری طولانی به همراه تعدادی اتصال زانویی، طراحی شده است.

دودکشی برای هدایت و خروج طبیعی و مکش محصولات داغ احتراق در بالای سرمشعل تعبیه شده است که امکان اندازه‌گیری غلظت محصولات احتراق و دمای آن را توسط دستگاه آنالیز گاز رافراهم می‌کند. در اندازه‌گیری آلاینده‌های منتشر شده CO و NO_x و دمای گازهای خروجی از سرمشعل از دستگاه گازسنج تستو ۳۵۰ استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دمای سطح سرامیک، سرمشعل و ظرف آزمون با دقت ۱ درجه سلسیوس از دماسنج لیزری پایرومتر (فروسرخ) استفاده می‌شود.

دمای سطح سرامیک بلافاصله بعد از قطع جریان سوخت و هوا اندازه‌گیری شده است چرا که با وجود شعله بر روی سطح، دما را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد که این منجر به خطا در اندازه‌گیری می‌شود.

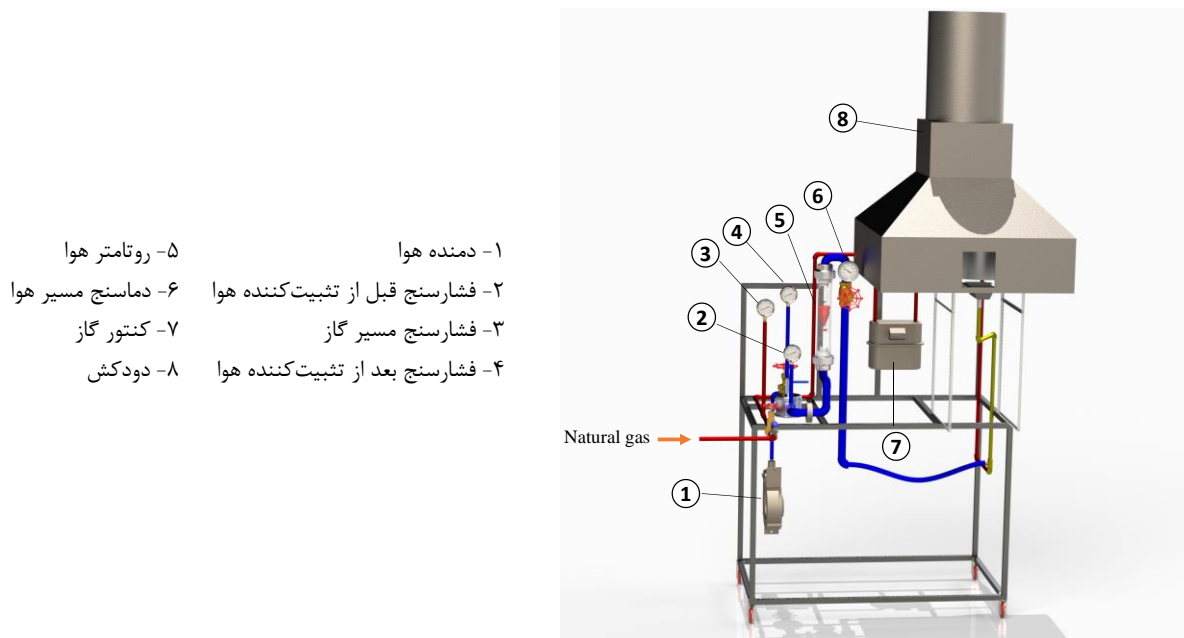


Figure 1- Experimental setup and its measurement equipment

شکل ۱- بستر آزمون تجربی و تجهیزات اندازه‌گیری آن

برای اندازه‌گیری دمای آب در گستره دمایی ۲۰ تا ۹۰ درجه از دماسنج جیوه‌ای با دقت ۱ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. تمام دستگاه‌های اندازه‌گیری که دقت و محدوده‌ی مناسبی دارند، در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱- محدوده اندازه‌گیری تجهیزات به همراه دقت آن‌ها

Table 1- Measuring range of equipment along with their accuracy

Measuring device	Measurement range	precision
Dial pressure gauge	0-40 mbar	1 mbar
	0-100 mbar	2 mbar
	0-250 mbar	5 mbar
Thermocouple type B	300-1600 °C	± 1°C
Air rotameter	0.5-45 m ³ /h	± 1 m ³ /h
	0.1-10 m ³ /h	± 1 m ³ /h
Gas meter	0-100000 m ³	± m ³ 0.001
Mercury Thermometer	0-100 °C	± 1°C
Pyrometer Infrared Thermometer	50-2200 °C	± 1°C

به طور خلاصه برای ارزیابی مشعل در شکل و جنس مختلف، بستر آزمون طراحی و ساخته شده است که در تحقیق حاضر از بستر موجود استفاده شده است. در شکل ۲ طرح‌واره بستر آزمون و چینش تجهیزات اندازه‌گیری آن با توجه به محدوده عملکرد مشعل پیش آمیخته در توان ۱۰-۱ کیلووات نمایش داده شده است. برای اندازه‌گیری دمای شعله و گازهای داغ احتراقی از ترموکوپل نوع B و S و برای اندازه‌گیری دمای آب از دماسنج جیوه‌ای استفاده شده است.

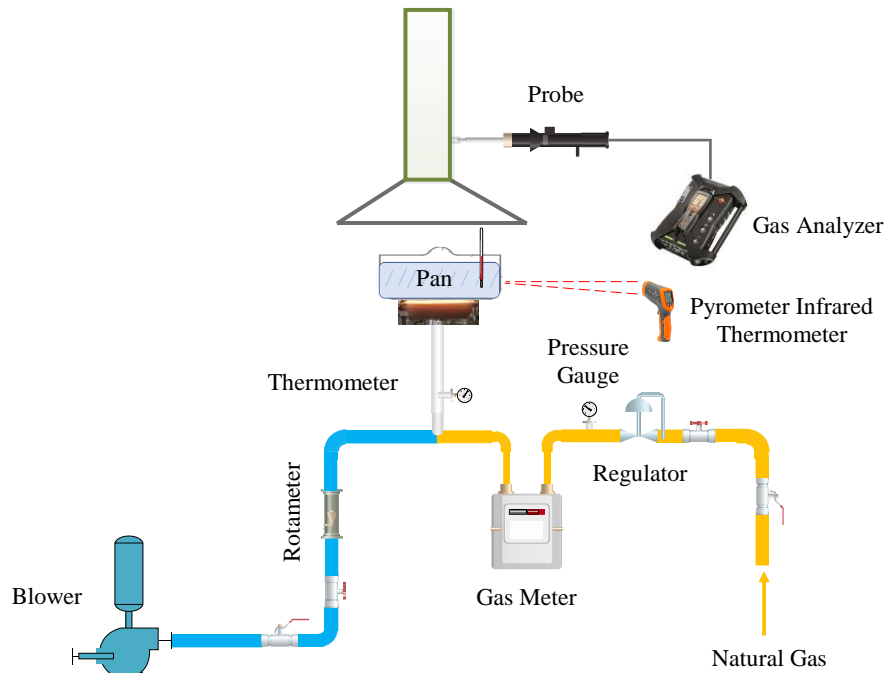


Figure 2- Schematic of the test setup and its main equipment

شکل ۲- طرح‌واره بستر آزمون و تجهیزات اصلی آن

محیط متخلخل سرامیکی که در شکل ۳ نشان داده شده است به طور عمده از SiO_2 ، Al_2O_3 و MgO تشکیل شده است. این محیط متخلخل دارای ۲۸۷۵ حفره به قطر ۲ میلی‌متر است که حفره‌های آن به صورت الگوی منظم بر روی سرامیک پخش شده‌اند. در این مشعل از محیط متخلخل سرامیکی به عنوان ناحیه احتراق و محیط متخلخل ساخته شده از توری فلزی در ناحیه پیش‌گرم استفاده شده است.

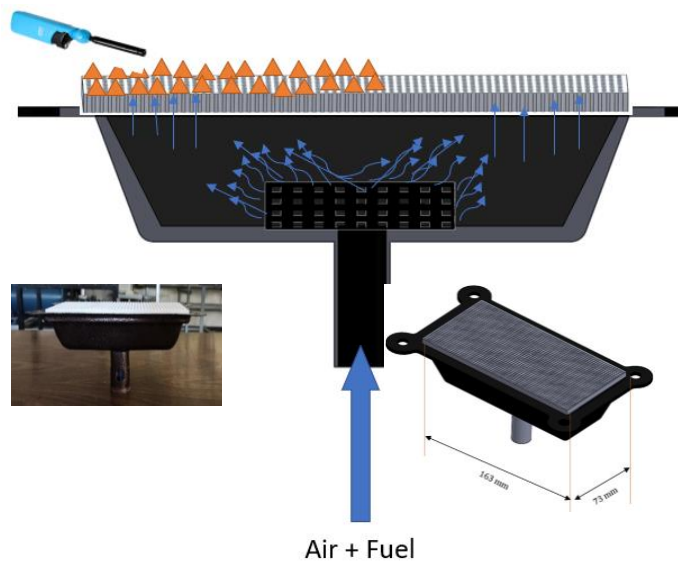


Figure 3- Ceramic burner utilized in the present experimental tests

شکل ۳- سرمشعل به کار رفته در آزمون‌های تجربی

اجزا محیط متخلخل سرامیکی که به طور عمده از SiO_2 ، Al_2O_3 و MgO تشکیل شده است در جدول ۲ نشان داده شده است. این محیط متخلخل دارای ۲۸۷۵ حفره به قطر ۲ میلی‌متر که حفره‌های آن به صورت الگوی منظم بر روی سرامیک پخش شده‌اند. ابعاد و خواص فیزیکی ناحیه احتراق و پیش‌گرم در جدول ۲ و ۳ آورده شده است.

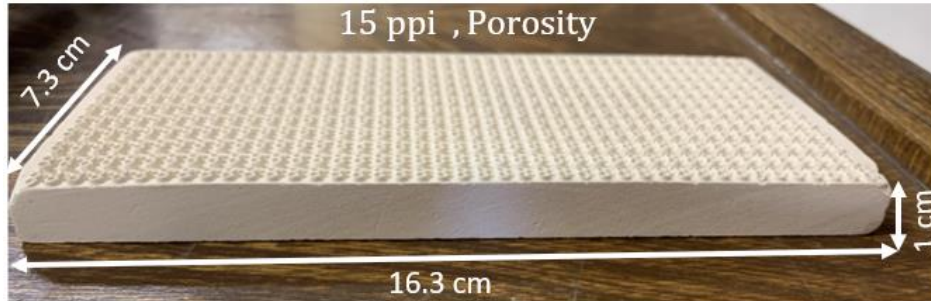


Figure 4- Ceramic characteristics of the burner head

شکل ۴- مشخصات سرامیک سرمشعل

جدول ۲- اجزا محیط متخلخل ناحیه احتراق

Table 2- Components of the porous medium of the combustion zone

chemical formula	components	Al_2O_3	SiO_2	CaO	NaO_2	MgO	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O
$(\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}\text{nH}_2\text{O}$	Percentage of components (%)	28.1	4.50	0.65	0.1	17.6	1.31	0.94	0.2

توری فلزی در مسیر سوخت و هوا قرار دارد و منجر به اختلاط و توزیع هر چه بهتر مخلوط ورودی می‌شود که در شکل زیر قابل مشاهده است. برای محاسبه میزان تخلخل این محیط متخلخل از نرم‌افزار تحلیل تصویر ایمیج جی^۱ استفاده شده است.

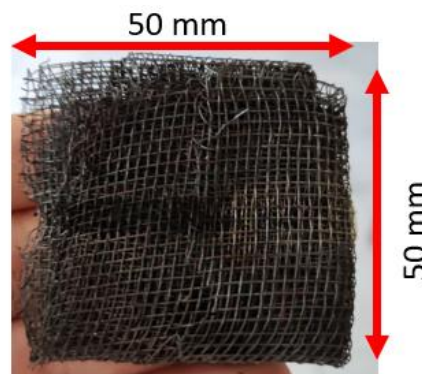


Figure 5 - The dimensions of the metal mesh in the preheated area

شکل ۵- ابعاد توری فلزی ناحیه پیش‌گرم

جدول ۳- مشخصات محیط متخلخل ناحیه پیش‌گرم و احتراق

Table 3- Characteristics of the porous medium in the preheat and combustion zone

porous medium	Porosity	Thickness (mm)	Dimensions (mm)
Metal mesh	0.3	12	50 × 50
Ceramic	0.61	10	73 × 163

¹ ImageJ

آماده‌سازی آزمون

در پژوهش حاضر، بهبود عملکرد یک مشعل متخلخل کم توان مطابق استاندارد ملی جهت انجام آزمون‌های راندمان حرارتی با سوخت گاز طبیعی در توان‌های حرارتی و نسبت هم‌ارزی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت هم‌ارزی مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\varphi = \frac{(FA)_{ac}}{(FA)_{st}} = \frac{(AF)_{st}}{(AF)_{ac}} \quad (1)$$

با توجه به رابطه (۱)، برای $\varphi > 1$ مخلوط غنی، $\varphi < 1$ مخلوط رقیق و در حالت $\varphi = 1$ مخلوط استوکیومتریک است. همچنین، بر اساس توان ورودی مشعل قطر ظرف مورد استفاده و حجم آب درون آن مطابق استاندارد ملی ایران، وسایل پخت و پز گاز سوز خانگی (ISIRI 10325) در جدول ۴ آورده شده است [۱۷].

جدول ۴- قطر ظرف و جرم آب بر اساس توان ورودی مشعل

Nominal input power of the burner (kW)	Inner diameter of container (mm)	Height of container (mm)	Mass of water in container (kg)
$1.16 < Q_n \leq 1.64$	220	140	3.7
$1.65 < Q_n \leq 1.98$	240	150	4.8
$1.99 < Q_n \leq 2.36$	260	160	6.1
$2.37 < Q_n \leq 4.2$	260	160	6.1
$4.2 < Q_n$	300	180	9.4

روند آزمون به گونه‌ای است که به منظور دستیابی به حد پایین تشکیل شعله در مخلوط رقیق و پیش‌آمیخته، آزمایش‌ها از نسبت هم‌ارزی پایین شروع می‌شود و به سمت نسبت هم‌ارزی بالاتر افزایش می‌یابد. در اندازه‌گیری راندمان حرارتی مطابق با استاندارد اجاق گاز ملی ایران (ISIRI 10325)، انجام آزمون باید در مدت زمانی انجام شود که دمای آب از ۲۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند. ابعاد و جنس ظرف آزمون نیز در استاندارد مذکور، مشخص شده است. راندمان حرارتی از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{(m_w C_w + m_p C_p) \times (T_2 - T_1)}{V_f LHV} \quad (2)$$

که در این رابطه m_p ، m_w به ترتیب جرم آب داخل ظرف و جرم ظرف، C_p ، C_w به ترتیب ظرفیت حرارتی ویژه آب و ظرف آلومینیومی، T_2 ، T_1 دمای اولیه و ثانویه آب داخل ظرف و LHV ، V_f به ترتیب حجم مصرفی سوخت و ارزش حرارتی پایین آن است. ارزش حرارتی سوخت برابر $\frac{32}{5} \frac{MJ}{m^3}$ در نظر گرفته شده است. در هر توان آزمون‌های انجام شده ۳ مرتبه تکرار شده و با توجه به آن‌ها مقدار میانگین داده‌ها و انحراف از معیار آن به عنوان داده درست گزارش شده است و از رابطه (۳) نیز استخراج می‌شود.

$$Data_{final} = M_{total} \pm \sigma_{total} \quad (3)$$

که در رابطه بالا M_{total} میانگین داده‌ها، σ_{total} انحراف از معیار داده‌ها و $Data_{final}$ داده نهایی است.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، افزایش راندمان حرارتی با استفاده از احتراق سطحی و بهبود میزان نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشع با افزایش دمای سطح سرمشعل و کاهش انتشار آلاینده CO و NO_x است. به این منظور آزمون‌های تجربی برای بررسی راندمان

حرارتی، نوع و رژیم شعله، توزیع دمای سرمشعل و قابلمه، نرخ انتقال حرارت و آلاینده‌گی انجام شده است. سرامیک استفاده شده در این مشعل دارای حفره‌های سازمان یافته‌ای است. مطابق شکل ۶ طراحی این مشعل به گونه‌ای است که شعله به سطح محیط متخلخل چسبیده و شعله سطحی منجر به افزایش دمای سرامیک می‌شود و این امر نرخ انتقال حرارت تابشی به ظرف آزمون را تقویت می‌کند. برای بررسی بیشتر محدوده عملکردی و پایداری این مشعل، آزمون‌هایی در توان، نسبت هم-ارزی‌های مختلف انجام شده است که در ادامه ارائه می‌شوند.

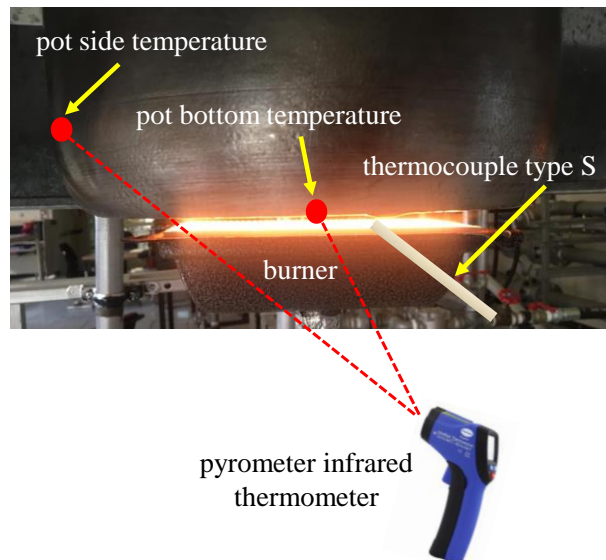


Figure 6- Measuring the temperatures of the flame and test container of the burner
شکل ۶- اندازه‌گیری دمای شعله و ظرف آزمون

در آزمایش‌های انجام شده، نسبت هم‌ارزی به عنوان پارامتر مؤثر که نشان دهنده میزان هوای موجود در مخلوط سوخت و هوا است، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل شعله، رژیم شعله، دمای شعله و به طور کلی عملکرد مشعل به شدت وابسته به این پارامتر مهم است که در ادامه وابستگی راندمان حرارتی و نرخ انتقال حرارت به این پارامتر شرح داده شده است. در شکل ۷ تغییر شکل و رژیم شعله برای توان ۹/۸۳ کیلووات و در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ تا ۱/۲ قابل مشاهده است. دلیل انتخاب توان ۹/۸۳ کیلووات این است که می‌تواند ارزیابی از عملکرد مشعل در توان‌های بالا و در کاربرد آشپزخانه‌های صنعتی نشان دهد.

در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ حالتی از ناپایداری شعله آبی (برخاستگی شعله) اتفاق می‌افتد و با افزایش نسبت هم‌ارزی، طول شعله زیاد شده و شعله زرد تشعشی تشکیل می‌شود. نکته قابل توجهی که وجود دارد این است که با حرکت مخلوط سوخت و هوا از مخلوط رقیق $\phi = 0.8$ به مخلوط غنی $\phi = 1.2$ میزان هوای موجود در مخلوط ورودی کم می‌شود. این امر منجر به کاهش سرعت مخلوط شده و در ادامه سرعت سوزش شعله را کم می‌کند؛ از این رو در نسبت هم‌ارزی‌های بالا و در محدوده رژیم غنی‌سوز، شعله بعد از برخورد به کف ظرف بواسطه سرعت کم آن توانسته به صورت خط جریانی از کنار ظرف عبور کند و سهم انتقال حرارت جانب را زیاد کند؛ البته کاهش سرعت مخلوط ورودی از حد معینی می‌تواند منجر به پدیده نامطلوب بازگشت شعله شود؛ چرا که سرعت سوزش شعله به سرعت مخلوط ورودی غلبه می‌کند و شعله به سمت داخل مشعل کشیده می‌شود.



Figure 7- Change in shape and flame regime from equivalence ratio 0.8 to 1.2 in thermal power kW 9.83

شکل ۷- تغییر شکل و رژیم شعله از نسبت هم‌ارزی ۰/۸ تا ۱/۲ در توان حرارتی ۹/۸۳ kW

در شکل ۸ راندمان حرارتی، توزیع دمای سرامیک و زیر ظرف آزمون و نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشعی در توان حرارتی ۹/۸۳ کیلووات نشان داده شده است. در فاصله ۱ cm سرمشعل تا ظرف آزمون، بازده حرارتی با افزایش نسبت هم‌ارزی افت پیدا می‌کند. دلیل این رفتار بازده حرارتی با بررسی سهم انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی و همچنین دمای شعله و سرمشعل مشخص می‌شود. در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ جهشی در منحنی راندمان حرارتی رخ می‌دهد. در ادامه، با افزایش نسبت هم‌ارزی از حالت استوکیومتری به سمت رژیم غنی‌سوز $\phi > 1$ مقدار بازده حرارتی در حدود ۷/۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل رشد نامطلوب شعله اطراف ظرف و فاصله گرفتن آن از دیواره کناری ظرف و در نتیجه آن، افزایش حرارت اتلافی از کنار ظرف و کاهش اثر جت شعله برخوردار است.

همچنین در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ شعله آبی رنگ دارای نوسان بوده و بر روی لایه‌ای از هوا تشکیل شده است و با افزایش نسبت هم‌ارزی شعله به سمت شعله پایدار حرکت و عملاً رژیم آن از شعله آبی به شعله زرد تشعشعی تغییر می‌کند. همچنین طول شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی به تدریج تغییر می‌کند به این صورت که در نسبت هم‌ارزی‌های بالا شعله به سمت دیواره ظرف آزمون کشیده می‌شود و طول آن زیاد می‌شود.

با توجه به سهم انتقال حرارت جابه‌جایی در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰/۸ تا ۰/۸۵، این مقدار افزایش پیدا کرده است چرا که انتقال حرارت تشعشعی به دلیل افزایش اختلاف دمای سرامیک با دمای زیر ظرف، زیاد شده است. در کنار انتقال حرارت

تابش، سهم انتقال حرارت جابه‌جایی نیز به‌واسطه کاهش جت برخوردی به زیر ظرف مقداری کم شده است؛ بنابراین سهم انتقال حرارت تابشی به طور قابل توجهی زیاد و جابه‌جایی به مقدار ناچیز کم می‌شود و این حرارت زیادی را به ظرف آزمون رسانده و باعث افزایش بازده حرارتی می‌شود.

در منحنی راندمان حرارتی با عبور نسبت هم‌ارزی از مقدار ۰/۸۵، راندمان حرارتی با وجود روند صعودی دمای شعله و سهم انتقال حرارت تابشی افت پیدا می‌کند. این می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش نسبت هم‌ارزی عملاً سرعت مخلوط ورودی کاهش و در ادامه سرعت شعله و جت برخوردی ناشی از آن به ظرف کم می‌شود و این باعث کاهش سهم انتقال حرارت جابه‌جایی شده و از طرفی شیب تغییرات این مود انتقال حرارت زیاد است؛ بنابراین تأثیر بیشتری بر راندمان حرارتی گذاشته و باعث افت آن می‌شود.

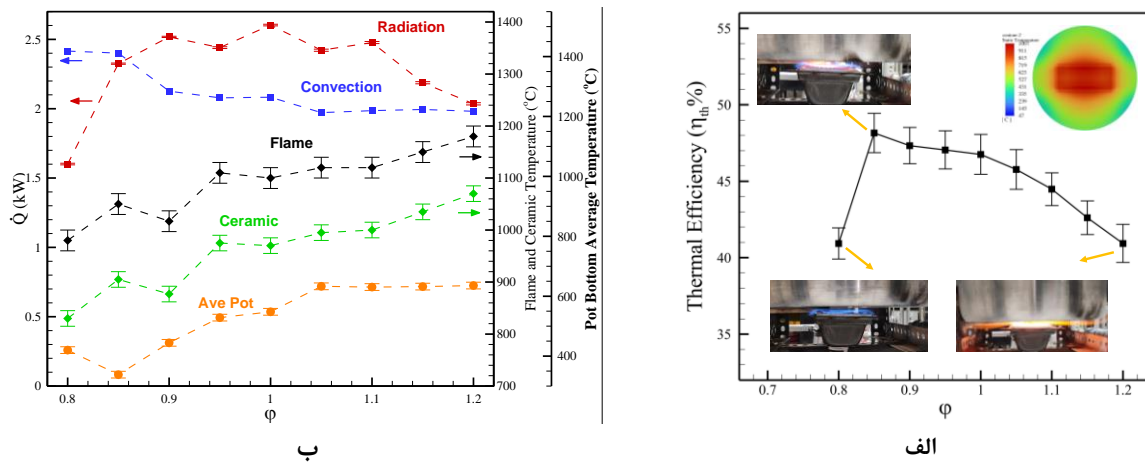


Figure 8- Investigation of a) thermal efficiency and b) contribution of the heat transfer rate and temperature distribution at 9.83 kW power

شکل ۸- بررسی الف) راندمان حرارتی و ب) سهم نرخ انتقال حرارت و توزیع دما در توان ۹/۸۳ kW

مطابق با شکل ۹ که تغییر راندمان حرارتی را در سه توان حرارتی مختلف و در فاصله ۱ سانتی‌متر سرمشعل تا ظرف آزمون نشان می‌دهد؛ در بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر روی راندمان حرارتی در یک فاصله و در یک توان خاص می‌توان گفت که تقریباً به طور کلی در رژیم غنی سوز $\phi > 1$ با افزایش نسبت هم‌ارزی، راندمان حرارتی افت پیدا می‌کند. به این دلیل که در این محدوده از نسبت هم‌ارزی میزان نرخ انتقال حرارت به دلیل سرعت شعله کمتر نسبت به رقیق‌سوزی، کمتر است؛ بنابراین در مشعل در این محدوده نسبت هم‌ارزی در تمام توان‌ها نمی‌تواند راندمان بالا داشته باشد؛ در حالی که بیشینه مقدار راندمان حرارتی در نسبت هم‌ارزی $0.7 < \phi < 1$ که اثر انتقال حرارت جابه‌جایی زیاد است، رخ می‌دهد و مقدار آن ۵۸/۳۳ درصد است.

در توان ۱/۸۳ کیلووات، راندمان حرارتی رفتار نزولی در کل دامنه نسبت هم‌ارزی از سمت رقیق‌سوزی به غلیظ‌سوزی دارد و بیشینه مقدار آن مربوط به نسبت هم‌ارزی ۰/۷ که مقدار آن ۵۸/۳۳ درصد است. زیرا در این توان، سرعت سوخت و هوا کمتر از سرعت مخلوط در توان دیگر است و در نتیجه، میزان نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی آن پایین‌تر است. همچنین در این توان، بخشی از شعله به داخل سرمشعل کشیده شده می‌شود و احتراق به صورت مدفون و سطحی رخ می‌دهد؛ ولی به دلیل سرعت بالای مخلوط ورودی و اختلاف دمای زیاد شعله و زیر ظرف با افزایش توان در نسبت هم‌ارزی‌های حالت رقیق‌سوزی مقدار نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی همراه با نرخ انتقال حرارت تابشی افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت هم‌ارزی میزان هر دو نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد و تأثیر منفی بر روی راندمان حرارتی دارد.

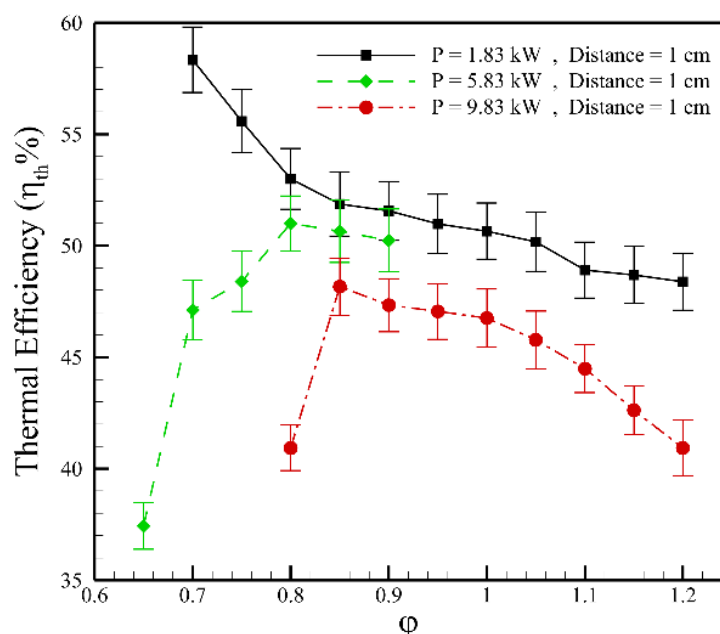


Figure 9- Changes in thermal efficiency versus to the equivalence ratio at a distance of 1 cm
 شکل ۹- تغییرات راندمان حرارتی بر حسب نسبت هم‌ارزی در فاصله ۱ CM

محدوده پایداری سرمشعل

در بررسی دامنه پایداری مشعل با توجه به شرایط مختلف آزمایش، عوامل ناپایداری از جمله پدیده خاموشی وزشی، پرش یا برخاستگی شعله و بازگشت شعله در نظر گرفته می‌شود. همچنین، محدوده نسبت هم‌ارزی که در آن شعله زرد تشعشعی تشکیل می‌شود در نقشه پایداری مطابق شکل ۱۰ ترسیم شده است.

پدیده خاموشی زمانی رخ می‌دهد که شعله به تدریج از لبه مشعل فاصله بگیرد و از طرفی به دلیل افزایش سرعت مخلوط ورودی، خاموش می‌شود که در همه آزمایش‌ها در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ خاموشی وزشی اتفاق می‌افتد و به تدریج با افزایش نسبت هم‌ارزی، شعله آبی بر روی لایه‌ای از هوا تشکیل می‌شود و همچنان شعله ناپایدار است که داده‌های آزمون‌های تجربی از این نسبت هم‌ارزی ثبت و یادداشت شده‌اند. در مرحله بعد که نسبت هم‌ارزی به سمت مقدار استوکیومتریکی حرکت می‌کند، عملاً شعله آبی رنگ به سمت شعله زرد تشعشعی تغییر می‌کند که عموماً دلیل این رنگ زرد شعله در احتراق سوخت‌های هیدروکربنی به دلیل وجود دوده است که علاوه بر این نزدیکی شعله به سطح سرمشعل که باعث برافروختگی و در نتیجه منجر به تشعشعات فرسرخ می‌شود.

در توان حرارتی پایین به دلیل اینکه سرعت مخلوط سوخت و هوای ورودی کم است، سرعت سوزش بیشتر از سرعت مخلوط ورودی نسوخته می‌باشد؛ از این رو شعله به سطح سرمشعل می‌چسبد و باعث سرخ شدن سطح آن می‌شود. هر چقدر توان حرارتی زیاد شود، سرعت مخلوط نسوخته نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین سرعت مخلوط نسوخته از سرعت سوزش بیشتر می‌شود و منجر به فاصله گرفتن شعله از سطح سرمشعل می‌شود. در نتیجه هر چقدر توان حرارتی زیاد شود، محدوده شعله زرد تشعشعی کمتر می‌شود که این در شکل ۸ نیز مشهود است.

در محدوده غنی‌سوز و تقریباً در نسبت هم‌ارزی بالای یک در برخی از توان‌ها پدیده بازگشت شعله اتفاق می‌افتد. هر چقدر نسبت هم‌ارزی زیاد شود هوای موجود در مخلوط ورودی کم می‌شود و عملاً سرعت مخلوط نسوخته کاهش می‌یابد؛ از این رو در نسبت هم‌ارزی‌های بالا و به خصوص بالاتر از یک، سرعت سوزش بر سرعت مخلوط ورودی غلبه کرده و شعله به سمت داخل سرمشعل و منبع سوخت و هوا کشیده می‌شود.

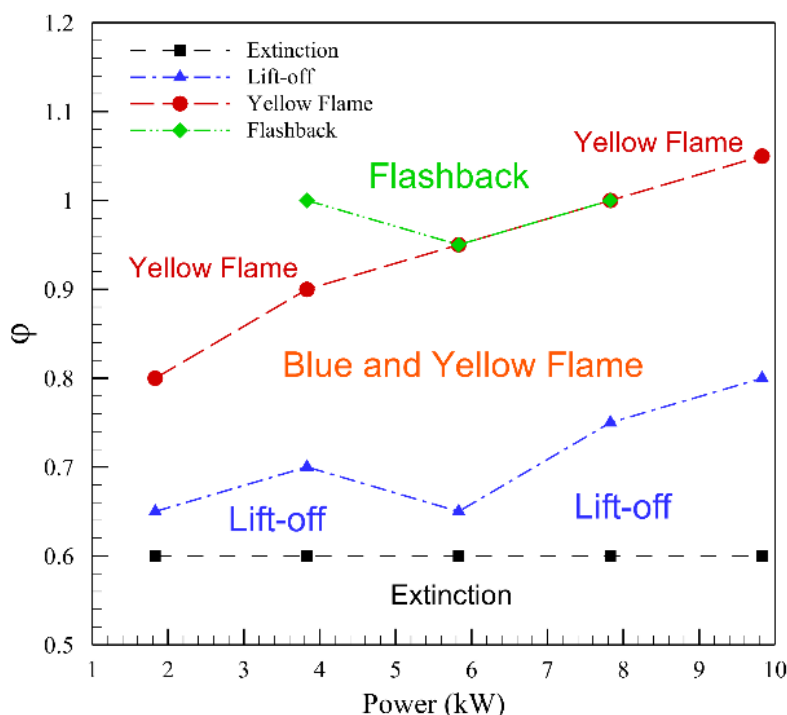


Figure 10- Stability map of burner operating at a distance of 1 cm

شکل ۱۰- نقشه پایداری کارکرد مشعل در فاصله ۱ cm

آلاینده‌گی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری تولید NO_x در تحقیق حاضر با توجه به اینکه در آزمون‌های تجربی در فرایند گرمایش از ظرف استاندارد استفاده شده است و این ظرف بخشی از حرارت تولیدی را بواسطه انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشع جذب می‌کند؛ بنابراین دمای محصولات احتراق در خروجی و در دودکش کم است و از آنجایی که انتشار NO_x به شدت به دمای شعله وابسته است، عملاً مقدار آن در حین اندازه‌گیری‌ها در فواصل و ظرفیت‌های مختلف و همچنین با تغییر نسبت هم‌ارزی، ناچیز و مقدار آن در همه آزمون‌ها زیر ۱ ppm بود.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری CO برای توان‌های حرارتی مختلف برحسب تغییرات نسبت هم‌ارزی برای فاصله متداول ۱ سانتی‌متری با توجه به اجاق‌گازهای خانگی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در یک توان و در محدوده غنی سوز $\phi > 1$ میزان تولید CO افزایش می‌یابد به این دلیل که هوای کافی برای سوختن با سوخت وجود ندارد و عملاً احتراق ناقص اتفاق می‌افتد و این نیز در نسبت هم‌ارزی‌های پایین مشاهده می‌شود که مخلوط سوخت هوا رقیق است و سوخت کافی برای احتراق و واکنش با هوا وجود ندارد و همچنین به دلیل سرعت مخلوط ورودی زیاد و به تبع آن زمان ماندگاری کم محصولات، غلظت CO بیشتر می‌شود. یکی از دلایل دیگر افزایش انتشار CO به احتراق ناقص در محفظه احتراق مربوط می‌شود. محدوده دمایی کم اطراف مشعل نیز می‌تواند از اکسیداسیون کامل CO به CO_2 جلوگیری کند.

در یک نسبت هم‌ارزی با افزایش توان حرارتی که منجر به افزایش سرعت مخلوط ورودی می‌شود به دلیل کاهش زمان ماندگاری محصولات احتراقی، CO بیشتری تولید می‌شود البته افزایش سرعت مخلوط ورودی منجر به اختلاط هر چه بهتر مخلوط سوخت و هوا می‌شود که در کنار دمای شعله بالا می‌تواند فرایند اکسید CO و تبدیل آن به CO_2 را تسریع داده و تولید CO را کاهش دهد و با افزایش انتشار CO رقابت کند.

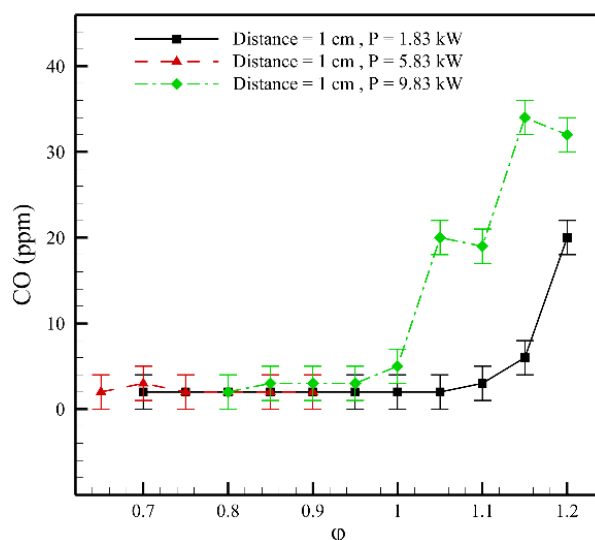


Figure 11- Emission of CO for different thermal powers and equivalence ratios at a distance of 1 cm
 شکل ۱۱- انتشار CO در توان حرارتی و نسبت هم‌ارزی مختلف در فاصله ۱ cm

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، عملکرد یک مشعل محیط متخلخل سازمان‌یافته با ناحیه پیش‌گرم در کاربرد پخت‌وپز خانگی و صنعتی به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. محدوده پایداری شعله و استخراج نقشه عملکردی مشعل در توان‌های حرارتی و نسبت هم‌ارزی مختلف با هدف دستیابی به بیشینه راندمان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در بررسی و توجیه رفتار بازده حرارتی، سهم نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی و تابش تفکیک و محاسبه شده است. توان حرارتی و نسبت هم‌ارزی به عنوان عوامل موثر بر عملکرد مشعل و اثر آن‌ها بر روی راندمان حرارتی، شکل و رژیم شعله، توزیع دما، نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشع، انتشار آلاینده CO و پایداری مشعل در فاصله ۱ سانتی‌متر مورد بحث قرار گرفت. مهمترین نتایج بدست آمده به شرح زیر هستند:

- در مشعل محیط متخلخل با ساختار سازمان یافته نقطه مناسب از جنبه راندمان حرارتی در نسبت هم‌ارزی ۰/۷ و توان حرارتی ۱/۸۳ کیلووات رخ می‌دهد.
- با افزایش نسبت هم‌ارزی از محدوده رقیق‌سوز به غنی‌سوز نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی به دلیل افت سرعت جت شعله برخوردی، کاهش می‌یابد.
- برای کاربرد بهینه مشعل از جنبه راندمان حرارتی و انتشار آلاینده‌گی پیشنهاد می‌شود که مشعل در بازه ۵-۱ کیلووات و در فاصله ۱ سانتی‌متری استفاده شود.
- یکی از راه‌کارهای مناسب برای جلوگیری از پدیده بازگشت شعله، افزایش فاصله بار آزمون و سرمشعل است که البته باید این فاصله آنقدر زیاد نشود که باعث افت راندمان حرارتی شود.

فهرست علائم

m	جرم، kg
C	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK
T	دما، K
V	حجم مصرفی، m^3
LHV	ارزش حرارتی سوخت، MJ/m^3

η	راندمان حرارتی
ϕ	نسبت هم‌ارزی
زیرنویس‌ها	
p	ظرف
w	آب
f	سوخت

مراجع

- [1] Chaffin, C., et al. Experimental investigation of premixed combustion within highly porous media. in Proceedings of the 1991 ASME JSME thermal engineering joint conference. 1991.
- [2] Howell, J., M. Hall, and J. Ellzey, Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media. Progress in Energy and Combustion Science, 1996. 22(2): p. 121-145.
- [3] Khanna, V., R. Goel, and J. Ellzey, Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner. Combustion science and technology, 1994. 99(1-3): p. 133-142.
- [4] Trimis, D. and K. Wawrzinek, Flame stabilization of highly diffusive gas mixtures in porous inert media. J Comput Appl Mech, 2004. 5(2): p. 367-381.
- [5] Bubnovich, V., et al., Flame stabilization between two beds of alumina balls in a porous burner. Applied Thermal Engineering, 2010. 30(2-3): p. 92-95.
- [6] Charoensuk, J. and A. Lapirattanakun, On flame stability, temperature distribution and burnout of air-staged porous media combustor firing LPG with different porosity and excess air. Applied Thermal Engineering, 2011. 31(16): p. 3125-3141.
- [7] Catapan, R., A. Oliveira, and M. Costa, Non-uniform velocity profile mechanism for flame stabilization in a porous radiant burner. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011. 35(1): p. 172-179.
- [8] Wu, D., et al., Experimental investigation on low velocity filtration Combustion in porous packed bed using gaseous and liquid fuels. Experimental thermal and fluid science, 2012. 36: p. 169-177.
- [9] Keramiotis, C., et al., Porous burners for low emission combustion: An experimental investigation. Energy, 2012. 45(1): p. 213-219.
- [10] Keramiotis, C. and M.A. Founti, An experimental investigation of stability and operation of a biogas fueled porous burner. Fuel, 2013. 103: p. 278-284.
- [11] Al-Attab, K., J.C. Ho, and Z. Zainal, Experimental investigation of submerged flame in packed bed porous media burner fueled by low heating value producer gas. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015. 62: p. 1-8.
- [12] Shakiba, S.A., et al., Effects of foam structure and material on the performance of premixed porous ceramic burner. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2015. 229(2): p. 176-191.
- [13] Ghorashi, S.A., et al., Experimental study on pollutant emissions in the novel combined porous-free flame burner. Energy, 2018. 162: p. 517-525.
- [14] Chaelek, A., U.M. Grare, and S. Jugjai, Self-aspirating/air-preheating porous medium gas burner. Applied thermal engineering, 2019. 153: p. 181-189.
- [15] Muthukumar, P. and P. Shyamkumar, Development of novel porous radiant burners for LPG cooking applications. Fuel, 2013. 112: p. 562-566.
- [16] Hossein Soltanian, Mehdi Maerefat, Mohammad Zabetian Targhi, On the drastic improvement of porous burner efficiency, Thermal Science and Engineering Progress, Vol 41, 1 Ju 2023, 101832.
- [17] ISIRI 10325, Domestic cooking appliances burning gas Specifications and test methods, vol. 3, no. 1, 2007.

English Abstract

Experimental Investigation of Flame Stability and Examination of Performance Map in a Structural Ceramic Porous Burner in Cooking Application

Saeed Mohammadbagheri¹, Mohammad Zabetian Taroghi^{2*}, Mohammadmahdi Heyhat³, Ali Ashuori⁴

1- Master's student, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, m_saeed@modares.ac.ir

2- Associate Professor, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, zabetian@modares.ac.ir

3- Associate Professor, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, mmheyhat@modares.ac.ir

4- Ph.D. Candidate, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, aliashouri@modares.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 11/04/2024, Received in revised form: 17/05/2024, Accepted: 24/05/2024)

This paper aims to experimentally investigate the partial premixed combustion in a structure ceramic porous burner for cooking applications. The thermal efficiency, pollutant emission, heat transfer rate and burner performance map are assessed. Moreover, in the analysis of the thermal efficiency behavior, the contribution of the convective and radiative heat transfer rates is separately studied. In this study, aluminum containers with dimensions according to Iran's national standard have been used in a wide range of thermal power range of 1.83-9.83 kW and equivalence ratio of 0.5-1.2. Natural gas has been used as the most used and most common fuel in domestic gas stoves. The results show that with the increase of the equivalence ratio from dilute to rich combustion, the shape and color of the flame changes significantly and the blue flame turns into a yellow flame with longer radiation. The best working point of the burner in terms of thermal efficiency has a thermal power of 1.83 kW and an equivalence ratio of 0.7, which is 58.33%. At this working point, the emission rate of CO pollutants is lower than the national standard of Iran, and the amount of NO_x is below 1ppm in all tests.

Keywords: partial premixed combustion, porous medium burner, thermal efficiency, heat transfer, stability map