مجموعه مقالات دهمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۱ تا ۳ اسفند ۱۴۰۲، ایران، تهران، دانشگاه تهران
FCCI-2024-1075

بررسی تجربی مشعل محیط متخلخل در کاربرد پخت و پز

سعید محمدباقری[۱]، محمد ضابطیان طرقی[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

چکیده
در این تحقیق به مطالعه تجربی احتراق نیمه پیش‌آمیخته در یک مشعل محیط متخلخل سازمان‌یافته کم توان در مصارف پخت و پز مطابق استاندارد ملی جهت بررسی راندمان حرارتی، انتشار آلاینده، بررسی نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشعی به کف قابلمه و در نهایت، استخراج نقشه عملکردی پرداخته شده است. در این مطالعه، از گاز طبیعی به عنوان پرمصرف‌ترین و متداول‌ترین سوخت در اجاق گازهای خانگی به عنوان سوخت استفاده شده است. علاوه بر مشعل با محیط سازمان یافته، آزمون‌هایی نیز بر روی مشعل متخلخل سیلیکون کارباید به عنوان مشعل پایه در محدوده ظرفیت ۳۶-۵ کیلووات به طور تجربی صورت گرفته است. در بستر آزمون موجود، از ظروف آلومینیمی با ابعادی مطابق استاندارد ملی ایران برای بررسی کمی انتقال حرارت استفاده شده‌است. بررسی عملکرد مشعل پخت و پز خانگی در محدوده وسیعی از توان حرارتی در بازه ۹.۸۳-۱.۸۳ کیلووات و نسبت هم‌ارزی در محدوده ۱.۲-۰.۵ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بهترین نقطه کاری به دست آمده برای مشعل در فاصله ۱ سانتی‌متری سرمشعل تا ظرف آزمون، توان حرارتی ۱.۸۳ کیلووات و نسبت هم‌ارزی ۰.۷ است که میزان راندمان حرارتی آن برابر ۵۸.۳۳٪ بود و از لحاظ انتشار آلاینده، میزان CO پایین تر از استانداردهای تعریف شده است و میزان NO_x نیز در تمامی آزمون‌ها زیر 1ppm است.
کلمات کلیدی: احتراق نیمه پیش‌آمیخته، مشعل محیط متخلخل، راندمان حرارتی، سطح سرمشعل، نقشه پایداری

۱- مقدمه

مطالعه و تحقیق بر روی بازده حرارتی و میزان آلایندگی شعله‌های اجاق گاز خانگی همواره مورد توجه بوده است. جهت بهبود بازده احتراقی در مشعل‌های مورد استفاده در اجاق‌های خانگی، فناوری جدیدی به نام احتراق در محیط متخلخل پیشنهاد شده و طی چند دهه گذشته، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است. احتراق در مشعل‌های محیط متخلخل از مزایایی همچون محدوده بالای ظرفیت، تولید آلاینده CO و NO_x کمتر و احتراق ایمن، برخوردار است. در واقع احتراق در این مشعل‌ها معمولا رقیق سوز بوده به این صورت که در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از یک نیز احتراق پایدار تشکیل می‌شود و به دلیل سطح زیاد محیط جامد آن نسبت به مشعل شعله آزاد، انتقال حرارت بهتری در فاز گاز در کنار افزایش انتقال حرارت تابشی سطح جامد آن ایجاد می‌شود که این امر منجر به توزیع دمای یکنواختی در سطح مشعل شده که این به نوبه خود محدوده پایداری را افزایش و میزان تولید آلایندگی را در این مشعل‌ها کاهش می‌دهد.

چافین و همکاران [۱] در پژوهش تجربی، میزان کاهش انتشار آلاینده NOx در محیط متخلخل سرامیکی را در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰.۶ تا ۰.۹۵ را نشان دادند. در تحقیق هاول و همکاران [۲] احتراق سوخت‌های فسیلی در محیط متخلخل رصد شد که در آن به برخی از ویژگی‌هایی مانند رسانایی، بازده تشعشع، ضریب جابه‌جایی و برخی ویژگی‌های سیال یعنی سرعت و آشفتگی پرداخته شده است. خانا 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 آلایندگی، 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 چرا که شعله با افزایش سرعت پیش مخلوط در نزدیکی خروجی مشعل تشکیل می‌شود و زمان کافی برای تبدیل CO به CO_2 وجود نخواهد داشت. ماتیس و الزی [۴] در تحقیق تجربی پایداری شعله، محدوده کارکرد و میزان انتشار آلاینده‌ها را در مشعل متخلخل بررسی کردند. آنها با استفاده از مشعل جنس YZA، به نرخ آتش در حالت شعله پایدار بین ۶۷۵ kW/m^2 تا ۳۹۵۱ kW/m^2 دست یافتند. وگل و الزی [۵] به طور تجربی عملکرد مشعل متخلخل که بخشی از آن فلزی بود را از لحاظ پایداری شعله در حالت زیر بی‌دررو و فوق بی‌دررو بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در نزدیکی نسبت هم‌ارزی ۱.۱ حد پایین و بالای سرعت کمینه است. در مطالعه تجربی دیگر بابنویچ و همکاران [۶] بین دو صفحه تخت حاوی گوی‌های آلومینا، پایدارسازی را 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.

کارینسوک و لپیراتاناکون [۷] به بررسی پایداری شعله و توزیع دما در یک محیط متخلخل به طور آزمایشگاهی پرداخته‌اند. 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 [۸] به طور تجربی به بررسی پایداری شعله در مشعل تابشی متخلخل پرداخته‌اند. 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 مطالعه آزمایشگاهی وو و همکاران [۹] 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 می‌یابد. ونگ و همکاران [۴۹] در تحقیق تجربی به بررسی احتراق پیش آمیخته متان و هوا در مشعل متخلخل استوانه‌ای از جنس اکسید آلومینیوم پرداختند. تأثیر نرخ جریان گاز، قطر ذرات اکسید آلومینیوم، نسبت هم ارزی بر تغییرات دمای محوری مشعل و جزئیات تغییر دمای گاز در طول روشن و خاموش شدن مشعل در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. آنها نشان دادند که در سرعت بیشتر از صفر، امکان احتراق سوپر آدیاباتیک وجود دارد و همچنین در نرخ جریان ورودی بالا و قطر ذرات کوچک‌تر اکسید آلومینیوم، نسبت هم‌ارزی بحرانی متناسب با احتراق سوپر آدیاباتیک بزرگ‌تر است.

کرامیوتیس و همکاران [۸] 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 آلایندگی 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 [۹] 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.

الاطباء و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای بر روی یک مشعل متخلخل متشکل از دو لایه اکسید آلومینیوم که در ناحیه پیش‌گرم دارای تخلخل ۴۰٪ و ناحیه احتراق دارای تخلخل ۶۰٪ بود، انجام دادند. نتایج به این صورت بود که در نسبت هم‌ارزی بیشتر از ۰.۷۱ شعله در سطح مشترک دو لایه پایدار بود. 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.

در تحقیق دیگر که توسط گائو و همکاران [۱۱] انجام شده است، از یک مشعل متخلخل دو لایه‌ای با جنس و میزان تخلخل مختلف ناحیه احتراق نظیر Al_2O_3، ZrO_2، SiC و FeCrAl استفاده شده است. در این تحقیق دما، سرعت، میزان آلایندگی و همچنین افت فشار در مشعل مورد ارزیابی قرار گرفته است. افزایش رسانش ماده‌ی متخلخل و یا کاهش چگالی حفره‌ها باعث وسیع‌تر شدن محدوده‌ی پایداری شعله شده است و همچنین میزان آلایندگی تأثیر کمی از رسانش حرارتی ماده می‌گیرد.

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 است. 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 مطالعه تجربی دیگر، وانگ و همکاران [۱۳] بر روی احتراق غنی سوخت متان در مشعل متخلخل بررسی انجام دادند. هدف این پژوهش بررسی تأثیر اندازه قطر گوی‌های آلومینا در ناحیه احتراق یک مشعل متخلخل دو لایه‌ای بود. نتیجه این مطالعه به این صورت بود که با افزایش قطر گلوی‌ها دمای مشعل به بالادست انتقال پیدا می‌کند و در نهایت مقدار قطر ۷.۵ میلی‌متر به عنوان اندازه بهینه از نظر بیشینه راندمان انتخاب شد. در پژوهشی که قریشی و همکاران [۱۴] 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. در این تحقیق اثر پارامترهایی همچون اثر تخلخل، نرخ آتش و جنس ماده محیط متخلخل بر روی انتشار آلاینده بررسی شد. 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 [۱۵] 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. حبیب و همکاران[۱۶] به طور تجربی رفتار احتراق در مشعل متخلخل با ورودی مخلوط متان و دی‌اکسیدکربن را نسبت به تغییرات نرخ جریان سوخت بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که نوسان دراز مدت در جریان سوخت منجر به ناپایداری احتراق می‌شود. در پژوهش دیگر، چن و همکاران [۱۷] بر روی احتراق نیمه پیش‌آمیخته و بهبود انتقال حرارت در مشعل متخلخل دو لایه‌ای میکرو مقیاس، بررسی تجربی انجام دادند که از اتانول به عنوان سوخت مایع و از فوم زیرکونیا و نیکل در مشعل استفاده کردند. در ناحیه تبخیر از فوم نیکل برای تبخیر هر چه بهتر سوخت و در ناحیه احتراق از فوم فلزی نیکل و فوم زیرکونیوم استفاده و نتایج را با مشعل شعله آزاد مقایسه کردند. نتایج به این صورت بود که فوم نیکل به خاطر قابلیت مکانیکی بهتر و توزیع منافذ یکنواخت‌تر نسبت به مشعل شعله آزاد در ناحیه تبخیر باعث افزایش انتقال حرارت و در نتیجه احتراق پایدار را نتیجه می‌دهد.

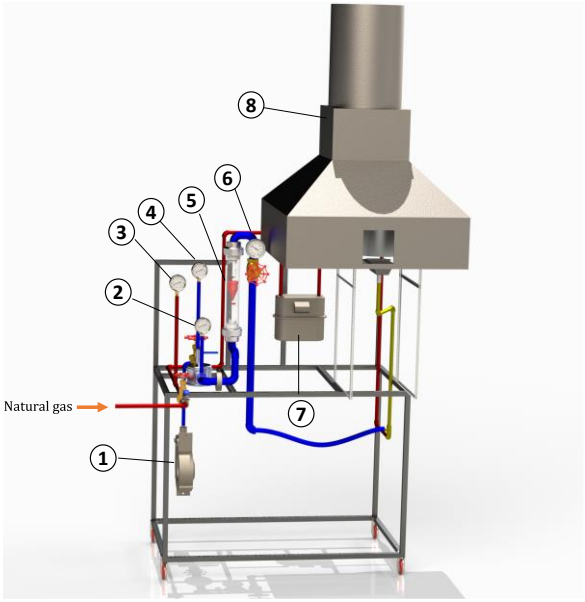
در مشعل‌های محیط متخلخل جهت مصارف پخت و پز نیاز به احتراق با توان بالا و تولید آلایندگی کم است. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مشعل محیط متخلخل صورت گرفته است؛ ولی مطالعات محدودی از مشعل‌های متخلخل در کاربرد پخت و پز و مقایسه عملکرد مشعل محیط متخلخل سرامیکی سازمان یافته و محیط متخلخل با توزیع حفرات نامنظم انجام شده است.

در تحقیق حاضر، جریان پیش‌آمیخته و مخلوط شده سوخت و هوا از شبکه محیط متخلخل منظم سرامیکی عبور می‌کند. با توجه به سرعت مخلوط ورودی، شعله نسبت به محل ورود در یک فاصله‌ای، پایدار می‌شود. اندازه و شکل شعله تشکیل شده در محیط متخلخل تابعی از نسبت هم‌ارزی و سرعت جریان ورودی است. مزیت استفاده از محیط متخلخل این است که امکان ایجاد احتراق پایدار را به ازای مقادیر زیادی از نرخ جریان ورودی (توان حرارتی بالا) می‌دهد.

توضیحات بستر آزمون

در بستر آزمون موردنظر، سوخت و هوا از دو خط اصلی گاز و هوا تغذیه می‌کند و به صورت جداگانه، قبل از رسیدن به سرمشعل با یکدیگر ترکیب می‌شوند. بیشینه دبی گاز و فشار با توجه به ظرفیت حداکثر طراحی شده (۳۰ کیلووات) به ترتیب ۳ مترمکعب بر ساعت و ۱۶ میلی بار است که از مسیر لوله با قطر ۱ اینچ عبور می‌کند. مسیر هوا با قطر ۱ اینچ و بیشینه دبی و فشار آن با توجه به بیشینه توان حرارتی مشعل و کمینه نسبت هم‌ارزی ۰.۵ به ترتیب ۴۵ مترمکعب بر ساعت و ۱۶۰ میلی بار است. دبی گاز و هوای ورودی برای کنترل بهتر و دقیق‌تر به ترتیب توسط کنتور گاز ($GS-84-04C$) رصد می‌شود. خط هوا از یک دمنده فشار گرفته و با تنظیم و تغییر دبی هوای ورودی نسبت هم‌ارزی مشعل تعیین می‌شود. دودکشی برای هدایت و خروج طبیعی و یا مکش محصولات داغ احتراق در بالای سرمشعل تعبیه شده است که امکان اندازه‌گیری غلظت محصولات احتراق و دمای آن را توسط دستگاه گازسنج فراهم می‌کند.

در اندازه‌گیری آلاینده‌های منتشر شده و دمای گازهای خروجی از سرمشعل از دستگاه گازسنج تستو استفاده شده است. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری آلاینده‌های CO، NO_x را به صورت ppm دارد. برای اندازه‌گیری دمای سطح سرامیک، سرمشعل و ظرف آزمون با دقت ۱ درجه سلسیوس از دماسنج لیزری (فروسرخ) استفاده می‌شود.



۱- دمنده هوا
۲- فشارسنج قبل از تثبیت‌کننده هوا
۳- فشارسنج مسیر گاز
۴- فشارسنج بعد از تثبیت‌کننده هوا
۵- روتامتر هوا
۶- دماسنج مسیر هوا
۷- کنتور گاز
۸- دودکش

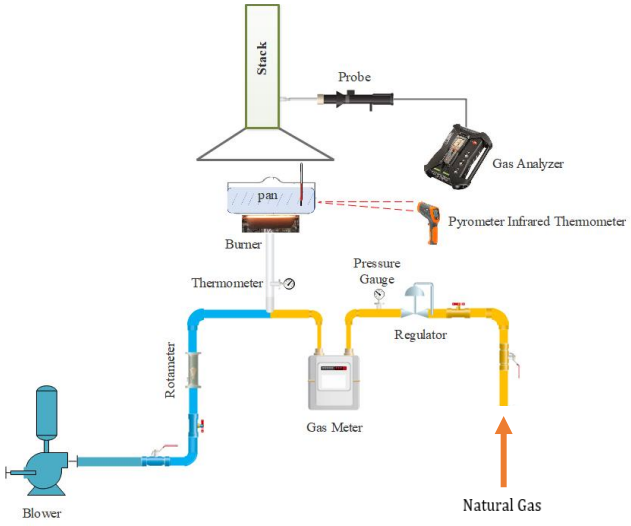
شکل ۱- بستر آزمون تجربی و تجهیزات اندازه‌گیری آن

تمام دستگاه‌های اندازه‌گیری که دقت و محدوده‌ی مناسبی دارند، در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱- محدوده اندازه‌گیری تجهیزات به همراه دقت آن‌ها

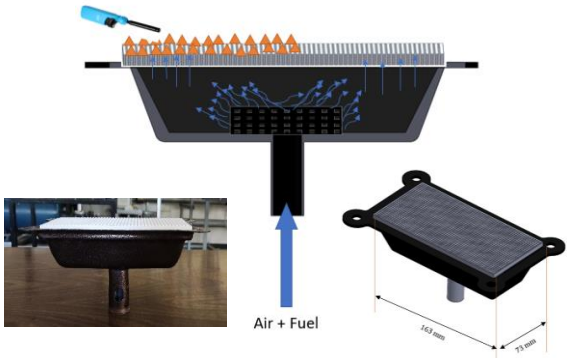
دستگاه اندازه‌گیری	محدوده اندازه‌گیری	دقت
فشارسنج عقربه‌ای	۰- ۴۰ mbar	۱ mbar
	۰- ۱۰۰ mbar	۲ mbar
	۰- ۲۵۰ mbar	۵ mbar
ترموکوپل نوع **B**	۳۰۰-۱۶۰۰ °C	± ۱°C
روتامتر هوا	۰.۵-۴۵ m^3/h	± ۱ m^3/h
	۰.۱-۱۰ m^3/h	± ۱ m^3/h
کنتور گاز	۰-۱۰۰۰۰۰ m^3	± ۰.۰۰۱ m^3
دماسنج جیوه‌ای	۰-۱۰۰ °C	± ۱°C
دماسنج لیزری	۵۰-۲۲۰۰ °C	± ۱°C

در **Error! Reference source not found.** شماتیک بستر آزمون و چینش آن با توجه به محدوده عملکرد مشعل پیش آمیخته در توان ۱۰- ۱ کیلووات نمایش داده شده است. تجهیزات و ابزارهای اندازه‌گیری به کار رفته در بستر آزمون به ترتیب قرارگیری آن‌ها نشان 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.



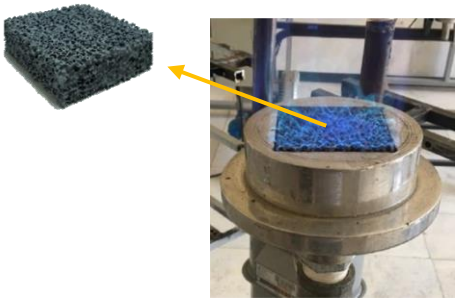
شکل ۲- نمایی کلی از بستر آزمون و تجهیزات اصلی آن

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.



شکل ۳- سرمشعل به کار رفته در آزمون‌های تجربی

در این تحقیق از مشعل پایه با محیط متخلخل سیلیکون کارباید (SiC) نیز استفاده شده است که در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴- نمایی از سرمشعل دایره‌ای با محیط سیلیکون کارباید

آماده‌سازی آزمون

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

برای تعیین حالت مخلوط از لحاظ غنی، رقیق و یا استوکیومتری از مفهوم نسبت هم‌ارزی مطابق رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$\phi = \frac{(FA)_{ac}}{(FA)_{st}} = \frac{(AF)_{st}}{(AF)_{ac}} \qquad (۱)$$

با توجه به رابطه بالا، برای $\phi > 1$ مخلوط غنی، $\phi < 1$ مخلوط رقیق و در حالت $\phi = 1$ مخلوط استوکیومتریک است.

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) در جدول ۲ آورده شده است [۱۸].

جدول ۲- قطر ظرف و جرم آب بر اساس توان ورودی مشعل

توان ورودی اسمی مشعل (kW)	ارتفاع ظرف آزمون (mm)	قطر داخلی ظرف آزمون (mm)	جرم آب درون ظرف (kg)
$1.16 < Q_n \leq 1.64$	۱۰۵	۲۲۰	۳.۷
$1.65 < Q_n \leq 1.98$	۱۱۰	۲۴۰	۴.۸
$1.99 < Q_n \leq 2.36$	۱۳۰	۲۶۰	۶.۱
$2.37 < Q_n \leq 4.2$	۱۳۰	۲۶۰	۹.۴
$4.2 < Q_n$	۱۵۰	۳۰۰	۹.۴

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 و به سمت نسبت هم‌ارزی بالاتر حرکت می‌کند و یا بالعکس.

مزیت شروع آزمایش از نسبت هم‌ارزی بالاتر نسبت به نسبت هم‌ارزی پایین، این امکان را فراهم می‌کند که دمای سطح سر مشعل به صورت طبیعی و تنها در اثر وجود خود شعله و تاثیرات آن گرم و این منجر به افزایش دقت آزمایش می‌شود، از طرفی با شروع از نسبت هم‌ارزی پایین به دلیل گرمایش سطح مشعل در اثر تشکیل شعله و پیش گرمایش مخلوط ورودی، دقت آزمایش کاهش می‌یابد در حالی که با آغاز آزمون‌ها از نسبت هم‌ارزی بالا، پایین دست جریان و محفظه احتراق، پیش‌گرم نشده و اطلاعات ثبت شده متاثر از این عوامل نمی‌باشد.

از معایب کاهش مقادیر نسبت هم‌ارزی، صرف زمان زیاد برای ایجاد تعادل دمایی دیواره محفظه احتراق با دمای محیط است. در حین آزمایش برای دستیابی به شعله پایدار، حالت‌های مختلفی از ناپایداری شعله در مخلوط رقیق و غنی مشاهده می‌شود که این مشاهدات در نسبت هم‌ارزی‌ها ثبت و گزارش شده‌اند.

در اندازه‌گیری رلندمان حرارتی مطابق با استاندارد اجاق گاز ملی ایران، 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 (۱) محاسبه می‌شود.

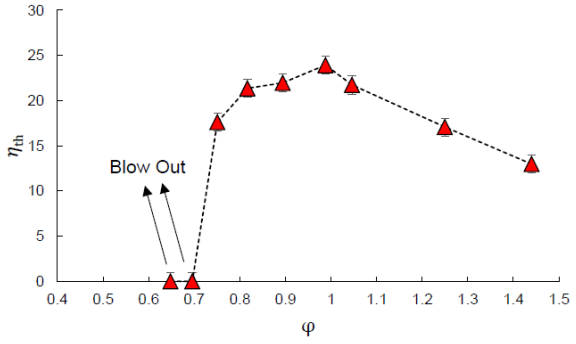
$$\eta = \frac{(m_w C_w + m_p C_p) \times (T_2 - T_1)}{V_f LHV} \qquad (۲)$$

که در رابطه بالا m_w، m_p به ترتیب جرم آب داخل ظرف و جرم ظرف، C_w، C_p به ترتیب ظرفیت حرارتی ویژه آب و ظرف آلومینیومی، T_1، T_2 دمای اولیه و ثانویه آب داخل ظرف و V_f، LHV به ترتیب حجم مصرفی سوخت و ارزش حرارتی پایین آن است. مقدار ارزش حرارتی برابر $\frac{MJ}{m^3}$ ۳۲.۵ در نظر گرفته شده است.

بحث بر روی نتایج

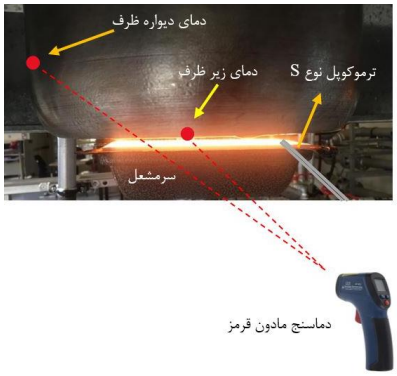
هدف این پژوهش، افزایش راندمان حرارتی با استفاده از احتراق سطحی و افزایش دمای سطح سرمشعل است. ابتدا آزمون‌هایی برای بررسی رفتار بازده حرارتی با مشعل متخلخل سیلیکون کارباید مطابق شکل ۵ انجام شده است.

در شکل ۵ بازده حرارتی فرایند گرمایش تحت نسبت‌های هم‌ارزی مختلف به دست آمده است. مشخص است که بازده حرارتی در هر دو طرف حالت $\phi = 1$ کم شده که منطقی بوده و در این مقدار بیشینه خود را در حالت استوکیومتریک دارد(۲۳.۹٪). با توجه به شکل با حرکت از حالت استوکیومتریک به سمت رژیم غنی‌سوز $\phi > 1$ باعث می‌شود که شعله اطراف ظرف به صورت نامطلوبی رشد کرده و از دیواره کناری فاصله بگیرید. در نتیجه آن، حرارت اتلافی از کناره، افزایش یافته و اثرات جت شعله برخوردی تضعیف شده که در نهایت
منجر به کاهش بازده می‌شود. از طرفی با حرکت از حالت استوکیومتریک به سمت رژیم رقیق‌سوز $\phi < 1$ شعله کناری به طور
کامل از بین رفته که منجر به دمای کناره، انتقال حرارت جانبی پایین و در بازده حرارتی کمتر می‌شود.



شکل ۵- بازده فرایند گرمایش بر حسب نسبت هم‌ارزی

در گام بعد برای هدایت بهتر سوخت و هوا از یک مشعل واگرا شکل استفاده شد. سرامیک استفاده شده در این مشعل دارای حفره‌های سازمان یافته‌ای است و طراحی این مشعل به گونه‌ای است که شعله به سطح محیط متخلخل چسبیده و شعله سطحی منجر به افزایش دمای سرامیک می‌شود و این توان تابشی مشعل (مطابق شکل ۶) به بار آزمون را تقویت می‌کند. برای بررسی بیشتر محدوده عملکردی و پایداری این مشعل آزمون‌های زیادی انجام شده است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

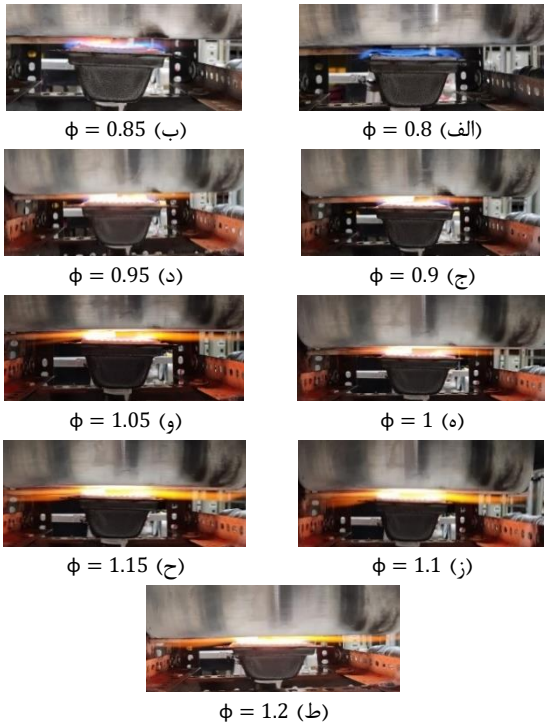


شکل ۶- اندازه‌گیری دما شعله و ظرف آزمون

– تأثیر نسبت هم‌ارزی بر روی راندمان حرارتی

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.

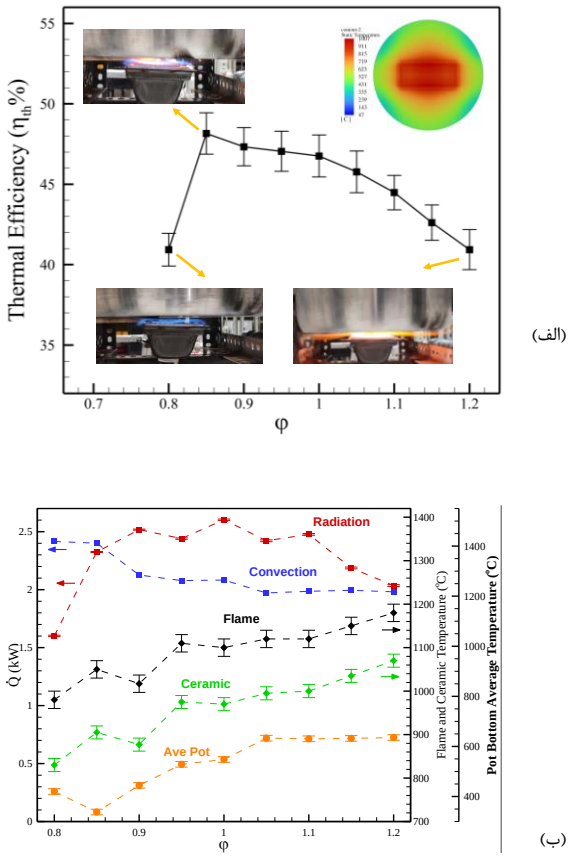
در **Error! Reference source not found.** تغییر شکل و رژیم شعله برای توان ۹.۸۳ kW در نسبت هم‌ارزی‌های ۰.۸ تا ۱.۲ قابل مشاهده است.



شکل ۷- تغییر شکل و رژیم شعله در توان ۹.۸۳ kW و نسبت‌های هم ارزی مختلف

نکته قابل توجهی که وجود دارد این است که با حرکت مخلوط سوخت و هوا از مخلوط رقیق $\phi = 0.5$ به مخلوط غنی $\phi = 1.2$ میزان هوای موجود در مخلوط ورودی، کم می‌شود. این عملا 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.

در فاصله ۱ cm و در توان ۹.۸۳ kW، بازده حرارتی با افزایش نسبت هم‌ارزی افت پیدا می‌کند. با بررسی سهم انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی و همچنین دمای شعله و سرمشعل می‌توان رفتار بازده حرارتی را با توجه به شکل ۸ توجیه کرد. در نسبت هم‌ارزی ۰.۸ جهشی در منحنی راندمان حرارتی رخ می‌دهد و در ادامه با افزایش نسبت هم‌ارزی و حرکت آن به سمت رژیم غنی‌سوز $\phi > 1$ مقدار بازده حرارتی به‌واسطه رشد نامطلوب شعله اطراف ظرف و فاصله گرفتن آن از دیواره کناری ظرف و در نتیجه آن، افزایش حرارت اتلافی از کنار ظرف و همچنین کاهش اثر جت شعله برخوردی، کاهش می‌یابد. 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.

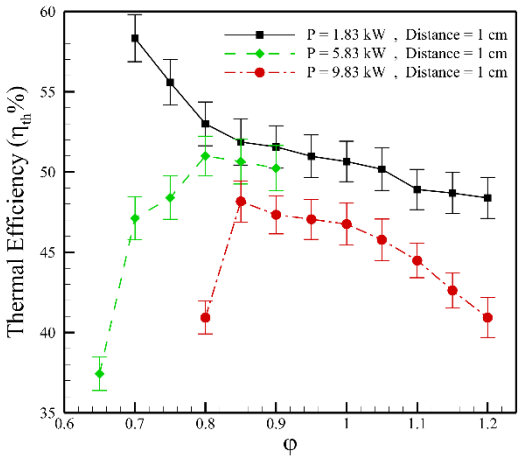


شکل ۸- بررسی پارامتریک در توان 9.83 kW الف) راندمان حرارتی و ب) سهم انتقال حرارت و توزیع دما

مطابق با **Error! Reference source not found.**۹ 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 حرارت کمی به دلیل سرعت پایین شعله به

ظرف می‌رسد؛ بنابراین در هر فاصله و توان حرارتی به‌کارگیری مشعل در این محدوده نسبت هم‌ارزی نمی‌تواند راندمان بالا تولید کند؛ در حالی که بیشینه مقدار راندمان حرارتی در نسبت هم‌ارزی $0.7 < \varphi < 1$ که اثر انتقال حرارت جابه‌جایی زیاد است، رخ می‌دهد.

در فاصله ۱ cm سرمشعل تا ظرف آزمون، در توان ۱.۸۳ کیلووات، راندمان حرارتی رفتار نزولی دارد و بیشینه مقدار آن مربوط به نسبت هم‌ارزی ۰.۸ که مقدار آن تقریبا ۴۸ درصد است چرا که در این توان سرعت سوخت و هوا کم بوده و مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی پایین است و بخشی از شعله به داخل سرمشعل کشیده شده است و احتراق به صورت مدفون و سطحی رخ می‌دهد؛ ولی در توان‌های بالاتر و در نسبت هم‌ارزی‌های پایین به دلیل سرعت بالای مخلوط ورودی و اختلاف دمای زیاد شعله با زیر ظرف، مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی در کنار انتقال حرارت تابشی، زیاد بوده و با افزایش نسبت هم‌ارزی این مقدار کم شده است و تأثیر منفی بر روی راندمان حرارتی دارد.



شکل ۹- تغییرات راندمان حرارتی بر حسب نسبت هم‌ارزی در فاصله ۱ cm

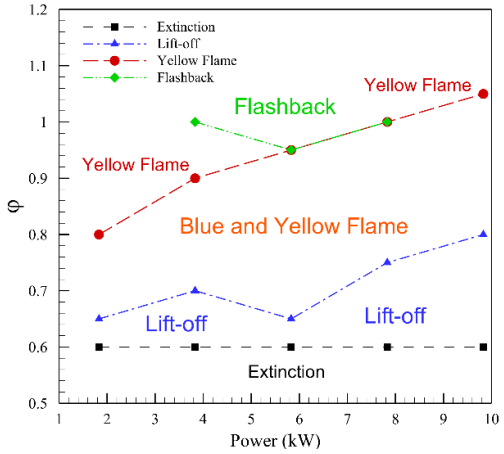
– محدوده پایداری سرمشعل

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 و همچنین محدوده نسبت هم‌ارزی که در آن شعله زرد تشعشعی تشکیل می‌شود در دیاگرام 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 استوکیومتریک حرکت می‌کند، عملا شعله آبی رنگ به سمت شعله زرد تشعشعی تغییر می‌کند که عموما 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 فروسرخ 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 تقریبا 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 عملا 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.

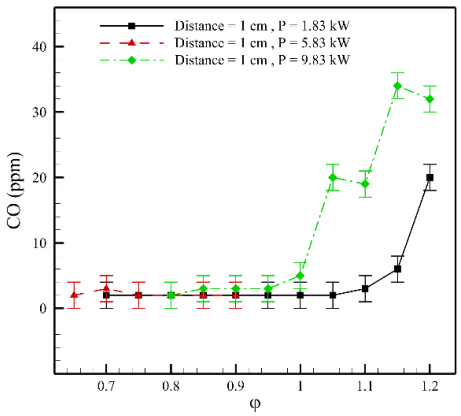


شکل ۱۰- بررسی محدوده پایداری کارکرد مشعل در فاصله ۱ cm

– آلایندگی

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، عملا مقدار آن در حین اندازه‌گیری‌ها در فواصل و ظرفیت حرارتی 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 بر حسب تغییرات نسبت هم‌ارزی در **Error! Reference source not found.** 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 عملا 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. 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.



شکل ۱۱- انتشار CO در توان حرارتی و نسبت هم‌ارزی مختلف در فاصله ۱ cm

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر عملکرد یک مشعل محیط متخلخل سازمان یافته در کاربرد پخت و پز خانگی و صـــنعتی به طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است.

- در مشعل محیط متخلخل سیلیکون کارباید، نقطه مناسب در نسبت هم‌ارزی تقریبا یک است که توان حرارتی ۲۴.۷ کیلووات برای ورودی در نظر گرفته می‌شود.
- در مشعل محیط متخلخل با ساختار سازمان یافته نقطه مناسب در نسبت هم‌ارزی ۰.۷ و توان حرارتی ۱.۸۳ کیلووات رخ می‌دهد.
- استفاده از مشعل با محیط سازمان یافته به جای مشعل محیط متخلخل سیلیکون کارباید، عملکرد مشعل را از لحاظ راندمان حرارتی بهبود داده است.
- برای کاربرد بهینه مشعل از جنبه راندمان حرارتی و انتشار آلایندگی 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

جرم، kg	**m**
گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK	c_p
نسبت هم‌ارزی	ϕ

زیرنویس‌ها

ظرف	**p**
آب	**w**

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- Mathis, W.M. and J.L. Ellzey, *Flame stabilization, operating range, and emissions for a methane/air porous burner.* Combustion Science and Technology, 2003. **175**(5): p. 825-839.

5- VOGEL, B.J. and J.L. ELLZEY, *Subadiabatic and superadiabatic performance of a two-section porous burner.* Combustion science and technology, 2005. **177**(7): p. 1323-1338.

6- 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.

7- 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.

8- 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.

9- 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.

10- 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.

11- Gao, H., et al., Methane/air premixed combustion in a two-layer porous burner with different foam materials. Fuel, 2014. **115**: p. 154-161.

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- Wang, Y., et al., Methane partial oxidation in a two-layer porous media burner with Al2O3 pellets of different diameters. Fuel, 2018. **217**: p. 45-50.

14- Ghorashi, S.A., et al., Experimental study on pollutant emissions in the novel combined porous-free flame burner. Energy, 2018. **162**: p. 517-525.

15- Chaelek, A., U.M. Grare, and S. Jugjai, *Self-aspirating/air-preheating porous medium gas burner.* Applied thermal engineering, 2019. **153**: p. 181-189.

16- Habib, R., et al., Unsteady ultra-lean combustion of methane and biogas in a porous burner–An experimental study. Applied Thermal Engineering, 2021. **182**: p. 116099.

17- Chen, X., et al., Effects of porous media on partially premixed combustion and heat transfer in meso-scale burners fuelled with ethanol. Energy, 2021. **224**: p. 120191.

18- ISIRI 10325, "Domestic cooking appliances burning gas Specifications and test methods," vol. 3, no. 1, 2007.