

بررسی تجربی بازده حرارتی در مشعل متخلخل جهت استفاده در مصارف توان پایین

حسین سلطانیان^۱، سعید محمدباقری^۲، محمد ضابطیان طرقي^{۳*}، رامتین الکایی^۴

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، soltanian.h@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، sadan1932016@gmail.com

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، zabetian@modares.ac.ir

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ramtin.elkaei@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

چکیده

این پژوهش به بهبود عملکرد یک مشعل متخلخل کم توان مطابق استاندارد ملی جهت انجام آزمون‌های راندمان حرارتی و دما با سوخت گاز طبیعی پرداخته است. فوم سرامیکی سیلیکون کارباید و فوم فلزی مسی به عنوان محیط متخلخل در بستر آزمون به کار رفته است. از شیوه‌های مختلفی اعم از تغییر جنس، ضخامت و چینش محیط متخلخل، اثر بازچرخش حرارت برای افزایش راندمان حرارتی در بستر آزمون حاضر، استفاده شده است. تغییر جنس محیط متخلخل از سرامیک به فلز در طی یک فرآیند گرمایشی استاندارد، در نسبت هم ارزی 0.894 باعث افزایش 2.14٪ بازده حرارتی شده است. تغییر رژیم احتراق از پیش آمیخته جزئی به پیش آمیخته کامل، باعث تغییر دمای کف ظرف آزمون از 850°C به 1300°C و باعث کاهش انتشار آلاینده CO، از 4ppm به 0.3ppm شده است و از طرفی دیگر بدلیل افزایش دما در ناحیه احتراق، آلاینده NO_x از 0.1 به 0.2 افزایش می‌یابد. راندمان حرارتی برای محیط متخلخل جدید سرامیکی که به طور عمده متشکل از اکسید سیلیسیم و اکسید منیزیم و همچنین آلومینا (Al₂O₃) بود؛ برای فاصله‌ی منتخب D = 1 cm بین کف ظرف آزمون و سطح مشعل در توان ۱.۵۶ کیلووات، 61.7٪ بدست آمد که افزایش چشمگیری نسبت به آزمون‌های قبلی داشت.

کلمات کلیدی: مشعل متخلخل، گاز طبیعی، فوم فلزی، رژیم احتراق، پیش آمیخته جزئی

مقدمه

امروزه کاهش مصرف سوخت و کاهش میزان آلاینده‌گی‌ها در جهت حفظ منابع طبیعی و پاکیزگی محیط زیست بسیار مورد توجه قرار گرفته است. لذا در طراحی دستگاه‌های مصرف کننده سوخت‌های فسیلی، پارامترهای فوق ذکر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به کاربرد فراگیر مشعل‌ها در نواحی شهری، تاسیسات خانگی و صنعتی، بهینه سازی آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. لزوم توجه به بازده تجهیزات احتراقی که وظیفه تبدیل ارزش حرارتی سوخت به گرمای هدف‌دار، جهت افزایش دمای یک بار حرارتی، امری اجتناب ناپذیر است. در این بین، در داخل و خارج از کشور مقدار قابل توجهی از مصرف خانگی مربوط به گاز طبیعی بوده که در دو حوزه گرمایش و همچنین پخت و پز به کار می‌رود. مطالعه و تحقیق بر روی بازده حرارتی و میزان آلاینده‌گی 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.

آودیک و همکاران [۱] به طور تجربی احتراق را در محیط متخلخل برای کاربردهای خانگی بررسی کرد. آنها نشان دادند که استفاده از مشعل متخلخل می‌تواند قدرت حرارتی را تا ۸ برابر در مقایسه با مشعل‌های خانگی راحت افزایش دهد و CO و NO_x کمتری منتشر می‌کند. در تحقیق یو و همکاران [۲] روی اثر جنس ماده محیط متخلخل روی میزان آلاینده‌گی و همچنین بازده مشعل یک بررسی انجام شد که سه نوع ماده عبارت بودند از

فیبر فلزی، سرامیک و فولاد ضد زنگ. بیشترین بازده مربوط به فیبر فلزی بود که بیشترین میزان تخلخل را نیز در بین سه نوع ماده مذکور دارا است. بر این اساس، فیبر فلزی به عنوان بهترین گزینه با توجه به انتشار آلاینده‌گی NO_x و CO و همچنین بازده و نسبت توان بیشینه به کمینه مطابق استاندارد اروپایی، جهت استفاده در دیگ‌های چگالشی به شمار می‌رود. این مشعل در یک مبدل حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است در واقع هدف اصلی از این مشعل کاربرد آن در سامانه‌ی گرمایشی آب واحدهای ساختمانی است و از کمپرسور برای بالا بردن فشار گاز ورودی استفاده شده است. موتوکومار و شیامکومار [۳] یک مشعل تابشی متخلخل با سوخت LPG برای کاربردهای پخت و پز ایجاد کردند. راندمان حرارتی فرآیند پخت و پز را با آزمایش‌های استاندارد شده آنها پیدا کرد. آنها بهترین بازده را ۷۵٪ با استفاده از سه تخلخل در نسبت هم ارزی و وات مختلف برای بهینه‌سازی تخلخل گزارش کردند. آنها همچنین انتشار گازهای NO_x و CO را بسیار کمتر از انتشار در مشعل‌های معمولی هند گزارش کردند. در پژوهش دیگر که توسط گائو و همکاران [۴] انجام شده است، از یک مشعل متخلخل دو لایه با جنس‌های مختلف ناحیه احتراق نظیر Al₂O₃، ZrO₂، SiC و FeCrAl و درصد تخلخل‌های گوناگون استفاده شده است. در این تحقیق دما، سرعت، میزان آلاینده‌گی و همچنین افت فشار در مشعل مورد ارزیابی قرار گرفته است. سوخت مورد استفاده متان بوده و از گوی‌هایی از جنس اکسید آلومینا در قسمت پیش گرم استفاده شده است. افزایش رسانش ماده‌ی متخلخل و یا کاهش چگالی حفره‌ها باعث وسیع‌تر شدن محدوده‌ی پایداری شعله شده است و میزان آلاینده‌گی تأثیر کمی از رسانش حرارتی ماده می‌گیرد. در پژوهش بعدی می‌شرا و همکاران [۵] به بررسی عددی و تجربی بر روی مشعل متخلخل دو لایه‌ای در کاربرد پخت و پز خانگی پرداخته‌اند که هدف بررسی اثر تغییر ضخامت ناحیه پیش گرمایش و احتراق بر روی عملکرد مشعل از نظر توزیع دما، انتشار CO و راندمان حرارتی است که ناحیه احتراق از فوم SiC با تخلخلیت ۹۰ درصد و ناحیه پیش گرمایش از گلوله‌های آلومینا با قطر ۳ mm تشکیل شده است.

شکیبا و همکاران [۶] ساختار فوم و مواد آن را بر روی عملکرد مشعل متخلخل سرامیکی با استفاده از دستگاه آزمایشی خود برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی فوم سرامیکی مورد استفاده در ناحیه احتراق مشعل بررسی کرد. مشعل آنها از چهار قسمت به نام‌های: پیش آمیخته، پیش گرم، احتراق و مبدل حرارتی تشکیل شده بود. آنها فوم‌های سرامیکی مختلف با تخلخل‌های مختلف را برای تأثیر آنها بر عملکرد مشعل بررسی کردند. نتایج نشان داد که راندمان حرارتی در فوم‌های با تخلخل کمتر با افزایش هوای اضافی به طور فوق‌العاده‌ای افزایش می‌یابد، در حالی که در تخلخل‌های بالاتر این تغییر چندان شدید نیست. آنها همچنین دریافتند که NO_x ppm با تخلخل افزایش می‌یابد. دستاورد دیگر این بود که فوم اکسید آلومینیوم در مقایسه با فوم‌های سیلیکون کارباید NO_x کمتری منتشر می‌کرد. الاطباء و همکاران [۷] بر روی یک مشعل متخلخل با

سوخت زیست توده متشکل از دو لایه اکسید آلومینیوم مورد مطالعه قرار گرفت. لایه زیرین مورد استفاده برای پیش گرمایش دارای تخلخل ۴۰٪ و لایه احتراق بالایی دارای تخلخل ۶۰٪ بود. نتایج نشان داد که مشعل متخلخل می تواند احتراق کارآمدی را برای زیست توده با ارزش حرارتی پایین ایجاد کند. مهمترین پارامتر در کار آنها نسبت هم ارزی بود به طوری که در بزرگی آن بیش از ۰٫۷۱ مشعل در سطح مشترک بین دو لایه پایدار بود. افزایش ضخامت بالا منجر به انتقال حرارت تشعشع بیشتر می شود در حالی که فراتر از ضخامت خاص باعث می شود سطح بیشتر و در نتیجه دمای مشعل کمتر شود و شعله به سمت پایین دست برود. محتوای CO با افزایش نسبت هم ارزی کاهش می یابد در حالی که NOx در ضخامت های مختلف لایه بالایی یکسان باقی می ماند.

در مطالعه تجربی که وانگا و همکاران [۸] روی احتراق غنی سوخت متان برای مشعل متخلخل صورت دادند به این صورت که گلوله های آلومینا به کار رفته در ناحیه احتراق اندازه های متفاوتی دارند. هدف این پژوهش بررسی تاثیر اندازه قطر گوی های آلومینا در ناحیه احتراق یک مشعل متخلخل دو لایه ای است. اساس کار به این صورت است که بعد از مخلوط شدن سوخت و هوا، این مخلوط وارد ناحیه پیش گرمایش که از گلوله های آلومینا به قطر ۲٫۵ mm پر شده، می شوند. پوسته مشعل از فولاد ضدزنگ ساخته شده و در داخل این پوشش بیرونی و خارج آن به ترتیب، استوانه ای از جنس آلومینیوم سیلیکات به خاطر ملزومات عایق کاری و فیبر کوارتز به کار رفته است. نتیجه این مطالعه به این صورت بود که با افزایش قطر گلوله های دمای مشعل به بالادست انتقال پیدا می کند و در نهایت مقدار قطر ۲٫۵ mm به عنوان اندازه بهینه از نظر زیاد بودن راندمان انتخاب شد. در پژوهشی که قریشی و همکاران [۹] در زمینه انتشار آلاینده در مشعل ترکیبی-آزاد انجام دادند و هدف از این مطالعه بررسی و تحلیل اثر اندازه سوراخ که در مرکز محیط متخلخل بود در این مطالعه اثر پارامترهایی همچون اثر تخلخل، نرخ آتش و جنس ماده محیط متخلخل بر روی انتشار آلاینده بررسی شد. نتیجه گیری آزمایش به این صورت بود که: ۱- با افزایش قطر حفره محیط متخلخل، انتشار CO کاهش پیدا می کند. ۲- در محدوده نسبت هم ارزی از ۰٫۷۷-۰٫۶۵ غلظت CO کاهش می یابد و در محدوده ۰٫۷۷-۰٫۸۳ افزایش می یابد. ۳- افزایش چگالی حفرات محیط متخلخل، انتشار CO را افزایش داد. ۴- با افزایش نرخ آتش، غلظت CO تولیدی کاهش یافت. ۵- تغییرات NOx به طور قابل توجهی به نسبت هم ارزی وابسته است و با افزایش آن، NOx تولیدی هم افزایش می یابد. ۶- استفاده از فوم Al₂O₃ انتشار CO را نسبت به SiC کاهش داد.

چالک و همکاران [۱۰] یک مشعل متخلخل با پیش گرم کردن هوای اتمسفر ایجاد کرد که طیف گسترده ای از احتراق پایدار در توان های مختلف دارد. آنها به دمای بیشتر از دمای آدیباتیک شعله رسیدند که منجر به کاهش مصرف انرژی ۲۹٪ در مقایسه با مشعل های معمولی شد. سبحانی و همکاران [۱۱] از یک مشعل متخلخل دو ناحیه ای با ماتریس درجه بندی شده فضایی استفاده کرد. نتایج محاسباتی و تجربی آنها نشان داد که طراحی ماتریس متخلخل تاثیر مهمی بر دامنه توان و بیش از ۵۰ درصد حد دمش بالاتر دارد که در مقایسه با طرح های راحت است. با تغییر توپولوژی ماتریس تغییر انقباض تابشی و تبادل حرارت، شعله بیشتر و در محدوده وسیع تری از شرایط عملیاتی تثبیت شد. پژوهشی لیو و همکاران [۱۲] در مورد مقایسه انتشار آلاینده و بازده حرارتی مشعل پیش آمیخته در دیگ بخار گازی متراکم انجام دادند که یکبار از مشعل سوراخ دار فولادی و بار دیگر مشعل فوم فلزی بود. آلاینده های CO و NOx بر

حسب نسبت هم ارزی و نرخ هوای اضافی برای دو جنس گزارش شد و همچنین راندمان حرارتی این دو مشعل نیز با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج به این صورت بود که در بارهای حرارتی بالا مشعلی که از فوم فلزی ساخته شده بود از نظر انتشار آلاینده و بازده حرارتی به مراتب، وضعیت مطلوب تری نسبت به مشعل فولادی داشت اما در بار حرارتی پایین بالعکس. انتشار آلاینده در مشعل فلزی به خاطر وجود شبکه توزیع یکنواخت با توجه به ماهیت ساختاری، نسبت به مشعل فولادی کمتر بود اما در نرخ هوای اضافی پایین مشعل فولادی از نظر بازده حرارتی مطلوب تر است و بهینه ترین مقدار نرخ هوای اضافی در این بررسی تجربی برابر با مقدار ۱٫۲ بود. امیدوی و دوازده امامی [۱۳] کارایی یک مشعل فلزی متخلخل را همراه با آلودگی آن بررسی کردند. آنها قدرت حرارتی و جیره هم ارزی را برای مطالعه بازده حرارتی و آلودگی تغییر دادند. حداکثر راندمان حرارتی آنها ۳۹٫۴٪ در نسبت معادل ۰٫۸ و توان ۱۰۰ کیلووات رخ داده است. آنها همچنین نشان دادند که NOx با افزایش توان حرارتی افزایش می یابد. مشعل متخلخل آنها در راندمان و انتشار در مقایسه با مشعل شعله آزاد بهبود یافته است. سونگ و همکاران [۱۴] برخی از ترتیبات مشعل متخلخل با بازیابی حرارت را به صورت عددی بررسی کرد. نتایج آنها نشان داد که قدرت مشعل، آرایش، ظرفیت حرارتی محیط و گردش مجدد حرارت تاثیر عمده ای بر انتشار موج احتراق دارد. آنها همچنین نشان دادند که دمای مشعل متخلخل سرامیکی بیشتر از محیط متخلخل فلزی سرامیکی به دلیل ظرفیت ذخیره سازی گرما است.

در پژوهش بعدی چن و همکاران [۱۵] بر روی احتراق نیمه پیش آمیخته و انتقال حرارت در مشعل متخلخل بررسی تجربی انجام دادند که از اتانول به عنوان سوخت مایع استفاده شد. مشعل آنها دو لایه ای بوده و در ناحیه تبخیر از فوم نیکل برای تبخیر هر چه بهتر سوخت استفاده شد و در ناحیه احتراق از فوم فلزی نیکل و فوم زیرکونیوم به کار رفت و نتایج با مشعل شعله آزاد مقایسه شد. نتایج به این صورت بود که فوم نیکل به خاطر قابلیت مکانیکی بهتر و توزیع منافذ یکنواخت تر نسبت به مشعل شعله آزاد (FF) در ناحیه تبخیر باعث افزایش انتقال حرارت و در نتیجه احتراق پایدار را نتیجه می دهد. استفاده از فوم نیکل در ناحیه احتراق به کاهش قابل توجه NOx کمک زیادی نسبت به مشعل شعله آزاد می کند و همچنین برتری که نسبت به فوم ZrO₂ داشت این بود که تلفات حرارتی کمتری داشت. حبیب و همکاران [۱۶] به طور تجربی پاسخ احتراق فوق العاده در مشعل متخلخل SiC به تغییرات نرخ جریان سوخت را بررسی کرد. مخلوط متان و دی اکسید کربن به مشعل وارد می شود. با استفاده از دماسنج محوری و دوربین دیجیتال، آنها به این نتیجه رسیدند که نوسان طولانی مدت در جریان سوخت منجر به بی ثباتی احتراق می شود که تاثیر انتقال حرارت ناپایدار در مشعل متخلخل را نشان می دهد در حالی که موقعیت شعله در نوسان است.

توضیحات بستر آزمون

در بستر آزمون مورد نظر، سوخت و هوا از دو خط اصلی گاز و هوا تغذیه می کند و به صورت جداگانه، قبل از رسیدن به سرمشعل با یکدیگر ترکیب می شوند. دبی گاز و هوای ورودی برای کنترل بهتر و دقیق تر به ترتیب توسط کنترلر گاز (GS-84-04C) و روماتر (ACA03 - 40) رصد می شود. خط هوا از یک دمنده (model 40-GM356) فشار گرفته و با تنظیم و تغییر دبی هوای ورودی نسبت هم ارزی مشعل تعیین می شود. دودکشی برای هدایت و خروج طبیعی و با مکشی محصولات داغ احتراق

از ترموکوپل نوع K و B به ترتیب برای اندازه گیری دمای داخل آب و شعله استفاده می شود. ترموکوپل نوع K در مرکز ظرف آزمون برای اندازه گیری دقیق تر استفاده شده است و ترموکوپل نوع B و S دمای شعله را در هر آزمایش پس از اصلاح دما به دلیل دمای تابش بالای سنسور مهره‌های خود اندازه گیری می کند.

محیط متخلخل به کار رفته از جنس سیلیکون کارباید (با ابعاد مختلف) و مسی (با ابعاد 7*7 سانتی متر مربع) و به ترتیب به ضخامت 2 و 1 سانتی متر است.

آماده سازی آزمون

در مرحله اول، آزمایش ها در فشار و دمای محیط 88.5 کیلو پاسکال و 16 درجه سانتیگراد انجام می شود. هر آزمایش، نسبت هم ارزی نزدیک به 1 نگه داشته می شود تا یک رژیم احتراق استاندارد برای مشعل متخلخل داشته باشد و نرخ های آتش مختلف (FR) برای تجزیه و تحلیل به مشعل معرفی می شود. با توجه به موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران ISIRI - 10325 که در استانداردهای داخلی نیز قابل ردیابی است، ظرف آلومینیومی با قطر 29 سانتی متر به وزن 0.6 کیلوگرم حاوی جرم آب 6.1 کیلوگرم از دمای 20 درجه سانتیگراد تا 90 درجه سانتیگراد گرم می شود. سپری شده برای این فرآیند برای تعیین بازده حرارتی با معادله استفاده می شود. (۱):

$$\eta = \frac{(m_w C_w + m_p C_p) \times (T_2 - T_1)}{V_f LHV} \quad (1)$$

که در آن m_w و m_p ، C_w ، C_p ، T_1 و T_2 مخفف جرم آب، جرم ظرف، ظرفیت گرمایی ویژه آب، ظرفیت گرمایی ویژه ظرف، ظرفیت حرارتی ویژه دمای اولیه ظرف، دمای اولیه است. و دمای نهایی بر حسب سانتیگراد. V_f حجم سوخت مصرفی در فرآیند گرمایش است و در نهایت LHV مقدار ارزش حرارتی سوخت گاز طبیعی است که طبق ISIRI - 10325 (برای فشار اتمسفر و شرایط 15 درجه سلسیوس در شرایط آزمایش) 37.78 MJ/m^3 می باشد.

بحث بر روی نتایج

برای بهبود عملکرد مشعل از نقطه نظر راندمان حرارتی و دما، شیوه‌های متنوعی در این پژوهش به کار رفته است که می توان به تغییر جنس و چیدمان محیط متخلخل در سرمشعل، ضخامت و چگالی حفرات محیط متخلخل، اعمال اثر بازگرمایش، پیش آمیخته کامل شعله و آرایش خاص سیم مفتول استیلی بر روی فوم سرامیکی اشاره کرد.

تغییر جنس محیط متخلخل از فوم سرامیکی به فلزی و یا استفاده همزمان این دو جنس در ناحیه پیش گرمایش و احتراق، باعث تغییر راندمان مطابق جدول (۲) است. فوم سرامیکی از جنس سیلیکون کارباید (ابعاد 7*7 سانتیمتر و چگالی 10ppi)، به ضخامت 2 سانتیمتر و فوم فلزی از جنس مس (ابعاد 7*7 سانتیمتر و تخلخلیت 80٪)، به ضخامت 1 سانتیمتر است. در این آزمایش نسبت هم ارزی $\phi = 0.894$ و فرآیند گرمایش استاندارد که در آن دمای آب از 20 درجه سلسیوس به 90 درجه سلسیوس افزایش می یابد؛ لحاظ شده است.

در بالای سرمشعل تعبیه شده است که امکان اندازه گیری غلظت محصولات احتراق و دمای آن را توسط گاز آنالیزور فراهم می کند.

برای اندازه گیری کسرهای CO، NO و NO_2 (دقت به ترتیب 1، 0.1 و 1 ppm) و دمای این محصولات داغ احتراقی از آنالیزر تستو استفاده شده است. برای اندازه گیری دمای زیرین و دیواره ظرف و یا سطح محیط متخلخل از دماسنج مادون قرمز (دماسنج تفنگی) با دقت 1 درجه سلسیوس با توجه به اینکه فاصله دماسنج مادون قرمز و ظرف 1 متر است برای داشتن ناحیه قطر 14 میلی متر روی ظرف استفاده می شود (مطابق با کاتالوگ دماسنج مادون قرمز). دماسنج مادون قرمز سه نقطه مختلف کف ظرف را هدف قرار می دهد تا دمای متوسط کف ظرف را برای محاسبه حالت تشعشع فرآیند گرمایش استفاده کند.

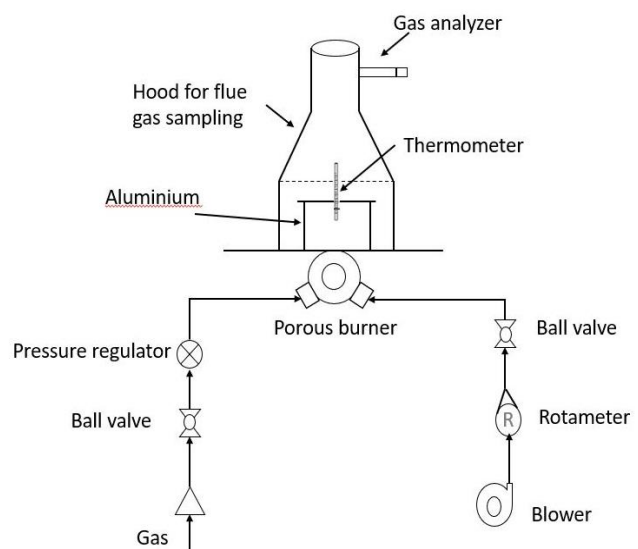
سایر دستگاه های اندازه گیری با دقت و محدوده مناسب برای نتایج در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱: محدوده و دقت تجهیزات اندازه گیری

Test rig measuring device	Range	Precision
pressure gauges (Bourdon type)	0-40 mbar	1 mbar
	0-100 mbar	2 mbar
	0-250 mbar	5 mbar
Thermometer (Bimetal)	0-60 °C	1 °C
Thermocouple (type B)	300-1600	1 °C
Thermocouples (type K)	0-500	1 °C
air rotameter flow rate	0.5-45 m ³ /h	±1 m ³ /h
gas meter	0-100000 m ³	±0.001 m ³
infrared thermometer	-30-550 °C	±1 °C

فشار اتمسفر و شرایط 15 درجه سلسیوس در شرایط آزمایش) 37.78 MJ/m^3 است.

بیشینه توان طراحی مشعل 10 KW بوده و با توجه به اینکه قابلیت تغییر در فاصله بین ظرف و سرمشعل وجود دارد؛ می توان برای توان های مختلف نیز به کار رود. در شکل ۱ شماتیک کلی از بستر آزمون نشان داده شده است.



شکل ۱: نمای کلی از بستر آزمون و تجهیزات اصلی آن

آرایش محیطی



باز چرخش حرارت

شکل ۲: چینش محیط متخلخل و بازچرخش حرارت

برای بررسی بهتر و دقیق اثرگذاری پارامترهای مذکور، آزمون جامعی در نظر گرفته شد و علاوه بر بازده حرارتی، دما و غلظت آلاینده‌ها نیز بررسی شد. به این ترتیب از دو فوم سرامیکی با هندسه مشخص و چگالی حفرت مختلف و فوم فلزی مسی استفاده شد. ظرف آزمون درب بسته نگه داشته شد و از فوم مسی بر روی فوم سرامیکی در سرمشعل استفاده شد اما به دلیل تحمل دمایی پایین فوم مسی و ذوب شدن آن، عملاً آزمایش متوقف شد. در مرحله بعد، از فوم سرامیکی مربعی با ابعاد 10×10 سانتیمتر و دایره‌ای با قطر 90 سانتیمتر و هر دو به ضخامت ۲ سانتیمتر استفاده شد به این صورت که یک بار فوم دایره‌ای و بار دیگر فوم مربعی در ناحیه پیش‌گرمایش قرار می‌گیرد. فوم دایره‌ای و مربعی به ترتیب با چگالی 20 PPI و 10 PPI بر روی یکدیگر قرار می‌گیرد. در حالتی که فوم مربعی در ناحیه پیش‌گرمایش قرار می‌گیرد در فرآیند گرمایش استاندارد، بازده به مقدار 13.43٪ رسید و همچنین آلاینده Nox در مقدار ناچیز 1.5 ppm یادداشت شد. بار دیگر فوم دایره‌ای در ناحیه پیش‌گرمایش قرار گرفت و این بار بازده 9.36٪ محاسبه شد و داده‌برداری آلاینده Nox، در مقدار 0.1 ppm بود. میانگین دمای شعله در حالت اول، $1203\text{ }^{\circ}\text{C}$ و در حالت دوم $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ و دمای گازهای خروجی در هر دو حالت یکسان و برابر با $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ است. دمای زیر و دیواره قابلمه در حالت اول به ترتیب $850-900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ و در حالت دوم $900-950\text{ }^{\circ}\text{C}$ است.

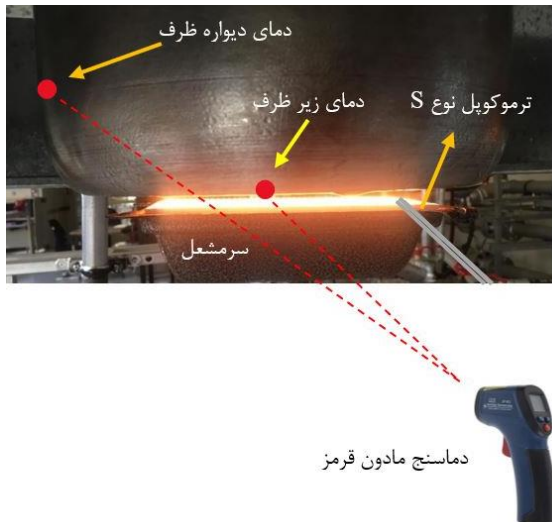
جدول ۲: بازده حرارتی با تغییر جنس محیط متخلخل

shape	material	Thermal Efficiency
Cu	Copper	20.3%
SiC	Silicon Carbide	18.16%
SiC Cu	Copper & Silicon Carbide	17.85%
Cu SiC	Silicon Carbide & Copper	15.93%

مطابق جدول بالا، استفاده از یک فوم به صورت تکی، بازده بیشتری نسبت به ترکیب دو فوم دارد و به خاطر رسانایی حرارتی بالای فوم مسی، استفاده از این جنس به صورت تکی مطلوب‌تر است اما از طرف دیگر، فوم مسی تحمل دمایی پایینی داشته و این یکی از معایب به کارگیری این جنس است که در ادامه بیشتر توضیح داده شده است.

تغییر چیدمان و نوع قرارگیری محیط متخلخل در اطراف سرمشعل نیز به عنوان پارامتر موثر بر افزایش بازده حرارتی، بررسی شده است. چهار عدد فوم سرامیکی مشابه با اندازه 10×5 سانتیمتر و ضخامت 2 سانتیمتر و در مرکز سرمشعل، فوم سرامیکی به ابعاد 7×7 سانتیمتر و ضخامت 20 سانتیمتر تعبیه شده است. بخشی از شعله پرسرعت به فوم‌های سرامیکی و در ادامه نیز به زیر و دیواره ظرف آزمون برخورد و بخشی نیز از اطراف سرمشعل فرار می‌کند. به این ترتیب بخش عمده‌ای از شعله که کارایی مطلوب را ایجاد نکرده و قصد فرار به اطراف را دارد؛ با آرایش محیطی در اطراف سرمشعل به دام افتاده و با برخورد آن به محیط متخلخل و ذخیره بصورت انرژی گرمایی در آن، در جهت بهبود عملکرد مشعل از نظر بازده حرارتی مفید واقع می‌شود. در این آزمایش، ابتدا فوم‌های سرامیکی به صورت محیطی اطراف سرمشعل قرار گرفته و در چینش دیگر دو فوم سرامیکی بر روی یکدیگر سوار شده و روی سرمشعل قرار می‌گیرد و بازده هر کدام از روش‌ها به ترتیب برابر با 19.1٪ و 11.1٪ است. بنابراین افزایش ضخامت محیط متخلخل به دلیل افت سرعتی که ایجاد می‌کند در جهت کاهش بازده حرارتی عمل کرده و چینش محیطی باعث بهبود عملکرد مشعل می‌شود. برای استفاده مجدد از حرارت عبوری از کناره ظرف آزمون، مکانیزمی تحت عنوان بازچرخش حرارت به کار گرفته شد به این صورت که اطراف قابلمه فویل آلومینیومی به صورتی قرار گرفته که حرارت با برخورد به آن به سمت دیواره ظرف برگشته و سپس وارد دوکش می‌شود و این مکانیزم باعث افزایش جزئی و ناچیز راندمان می‌شود.

به دو عدد 2 کیلووات و 1.56 کیلووات تقلیل داده شده و از سرامیکی که به طور عمده از اکسید سیلیسیم و اکسید منیزیم و همچنین آلومینا (Al_2O_3) تشکیل و استفاده شده است. بازه به دست آمده با استفاده از توان 1.56 کیلووات و محیط متخلخل مستطیلی به ابعاد 16.5 در 7.5 سانتی متر برابر با 61.7٪ به دست آمد که برای اجاق های خانگی دستاوردی بی نظیر در کشور است. در این حالت دمای شعله 1082 درجه سلسیوس و دمای کف ظرف 1500 درجه سلسیوس و دمای کنار ظرف 50 درجه سلسیوس است.



شکل ۵: اندازه گیری دما شعله و ظرف آزمون

نتیجه گیری

در کار حاضر، از یک مشعل متخلخل کم توان برای گرمایش ظرف استاندارد جهت تحلیل و ارزیابی پارامترهای موثر بر بازده حرارتی و دما استفاده شد.

- استفاده از فوم فلزی مسی به صورت تکی در ناحیه احتراق نسبت به استفاده از فوم سرامیکی سیلیکون کاربایدی و یا ترکیب هر دو آن ها، بیشینه بازده حرارتی را بدست می دهد که مقدار آن 20.3٪ است.
- چینش محیطی محیط متخلخل در اطراف سرمشعل نسبت به زمانی که فومها بر روی یکدیگر سوار شوند، از نظر جلوگیری از فرار بخشی از شعله به محیط اطراف که هنوز کارایی مطلوب را ایجاد نکرده عملکرد بهتری داشت و باعث تغییر بازده حرارتی از 11.1٪ به 19.1٪ شد.
- اعمال اثر باز چرخش حرارت در اطراف دیواره ظرف آزمون، به استفاده بهتر از شعله عبوری از اطراف ظرف و افزایش بازده حرارتی کمک می کند.
- افزایش ضخامت محیط متخلخل سرامیکی از 2 به 4 سانتیمتر، باعث کاهش راندمان می شود چرا که شعله تا عمق محیط متخلخل نفوذ کرده و در آنجا پایدار می شود و عملاً نیاز گرمایش که به شعله سطحی است؛ فراهم نمی شود.
- پیش آمیخته کامل رژیم احتراق، باعث تغییر دمای کف ظرف آزمون از 850°C به 1300°C و باعث کاهش انتشار آلاینده CO، از 4ppm به 0.3ppm شده است و از طرفی دیگر دلیل افزایش دما در ناحیه احتراق، آلاینده NO_x از 0.1 به 0.2 افزایش می یابد.



شکل ۳: بررسی اثر افزایش ضخامت محیط متخلخل

در آزمایش بعدی برای پیش آمیخته کامل سوخت و هوا، از محیط ایزوله (استوانه استیل نسوز) اطراف سرمشعل استفاده شده است به این صورت که شعله در استوانه استیلی محبوس می شود و از نفوذ هوا از محیط اطراف جلوگیری می شود و شعله Premix تشکیل می شود. برای جلوگیری از خفگی شعله، منافذی در اطراف محیط ایزوله در نظر گرفته شده است و در طرح جدیدی، تکه سیم های مفتولی از جنس استیل بر روی محیط متخلخل گرد به قطر 90 سانتیمتر و ضخامت 2 سانتیمتر با چگالی حفره 20 PPI به گونه ای قرار گرفته است که آرایش هیزمی تشکیل می دهد و از آن برای تغییر رژیم شعله و تابشی کردن آن استفاده می شود. نتایجی که از این آزمایش برای دما بدست آمد نسبت به آزمایش قبل تفاوت زیادی داشت؛ بطوریکه دمای شعله، زیر و دیواره قابلمه به ترتیب $1200 C^o$ ، $150 C^o$ و $1300 C^o$ و همچنین بازده حرارتی 13.33٪ بدست آمد. بازده پایین با دمای بالای زیر قابلمه توجیه می شود چراکه دمای زیاد زیر قابلمه در جهت معکوس تابش انجام می دهد و این اثر منفی در انتقال حرارت از شعله به ظرف آزمون دارد. آلاینده های CO و NO_x نیز در مقادیر 0.2 ppm و 0.3 ppm یادداشت شد.



ترموکوپل نوع B

شکل ۴: بررسی اثر پیش آمیخته کامل بر انتشار آلاینده CO و NO_x

برای افزایش بازده به میزان قابل توجه و با توجه به این که در مشعل های خانگی توان هایی کمتر از 3 کیلووات استفاده می شود، توان مورد آزمایش

12- Fengguo Liu, Longfeng Zheng, Rui Zhang, "Emissions and thermal efficiency for premixed burners in a condensing gas boiler," *Energy*, 2020.

13- M. Omid and M. D. Emami, 2020, "Experimental investigation of premixed combustion and thermal efficiency in a porous heating burner", *International Journal of Energy Research*, 45, 1948-1958.

14- Fuqiang Song, Zhi Wen, Yuan Fang, Enyu Wang, Xunliang Liu, 2020, "Combustion Wave Propagation of a Modular Porous Burner with Annular Heat Recirculation", *Journal of thermal science*, 29, 98-107.

15- X.Chen, J. Li, D. Zhao, M. T. Rashid, X. Zhou, N. Wang; Effects of porous media on partially premixed combustion and heat transfer in meso-scale burners fuelled with ethanol; *Energy* 2021.

16- Rabeeah Habib, Bijan Yadollahi, Ali Saeed, Mohammad Hossein Doranehgard, Larry K.B. Li, Nader Karimi, 2021, "Unsteady ultra-lean combustion of methane and biogas in a porous burner - An experimental study", *Applied Thermal Engineering*, 182, ISSN 1359-4311

- از سرامیک جدید که به طور عمده از اکسید سیلیسیم و اکسید منیزیم و همچنین آلومینا (Al_2O_3) تشکیل شده است؛ در دو فاصله‌ی منتخب $D=1$ cm و $D=2$ cm بین کف ظرف آزمون و سطح مشعل در توان 1.56 کیلووات استفاده شد که در فاصله 1 سانتیمتری با حفظ رژیم شعله در شرایط پایدار، بازده بالاتر و برابر با 61.7٪ و در فاصله 2 سانتیمتری بازده 57٪ بدست آمد.

فهرست علائم

m	جرم، kg
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK
	زیرنویس‌ها
p	ظرف
w	آب

مراجع

- 1- Avdic F, Adzic M, Durst F.,2010, "Small scale porous medium combustion system for heat production in households", *Applied Energy*, 87, 2148-2155.
- 2- B. Yu, S.-M. Kum, C.-E. Lee, and S. Lee, "Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners," *Energy*, 2013.
- 3- P. Muthukumar, P.I. Shyamkumar, 2013, "Development of novel porous radiant burners for LPG cooking applications", *Fuel* 112, 562-566
- 4- H. B. Gao, Z. G. Qu, X. B. Feng, and W. Q. Tao, "Methane/air premixed combustion in a two-layer porous burner with different foam materials," 2014.
- 5- S. Panigrahy, N. K. Mishra, S. C. Mishra and P. Muthukumar, 2016, "Numerical and experimental analyses of LPG (liquefied petroleum gas) combustion in a domestic cooking stove with a porous radiant burner", *Energy* 95, 404-414
- 6- Shakiba SA, Ebrahimi R, Shams M and Yazdanfar Z., 2015, "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*, 229, 176-191.
- 7- Al-attab KA, John Chung Ho, Zainal ZA., 2015, "Experimental investigation of submerged flame in packed bed porous media burner fueled by low heating value producer gas", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 62 1-8.
- 8- Yuqing Wanga,b, Hongyu Zengb, Yixiang Shib, Ningsheng Caib, "Methane partial oxidation in a two-layer porous media burner with Al_2O_3 pellets of different diameters," *Fuel*, 2018.
- 9- S. A. Ghorashi, S. A. Hashemi, S. M. Hashemi, M. Mollamahdi, 2018, "Experimental study on pollutant emissions in the novel combined porous-free flame burner", *Energy*, 162, 517-525.
- 10- Aekkaphon Chaelek, Usa Makmool Grare, Sumrerng Jugjai, 2019, "Self-aspirating/air-preheating porous medium gas burner", *Applied Thermal Engineering*, 153 181-189.
- 11- Shabani Nejad Hoda, Seyyed Abdolreza Gandjalikhan Nassab, Jahanshahi Javaran Ebrahim, 2019, "Three dimensional numerical simulation of combustion and heat transfer in porous radiant burners", *International Journal of Thermal Sciences*, 145, 1290-0729.