بررسی تجربی مشعل‌ شعله سطحی دیگ چگالشی و استخراج نقشه عملکردی

سید‌علی غضنفری1،محمد بهزادی ساروکلائی۲، محمد‌رضا علیگودرز۳\*، محمد‌بهشاد شفیعی۴، محمد ضابطیان طرقی۵

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجائی، تهران   
۲-دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

5- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* ایران، تهران، s.alighazanfari@gmail.com

\* ایران، تهران، Maligoodarz@yahoo.com

چکیده

در اين پژوهش، مشعل پيش آميخته شعله سطحي مورد استفاده در ديگ‌هاي چگالشي، مورد مطالعه آزمايشگاهي قرار مي‌گيرد. مشعل‌ها در شرايط كاري مختلف از نظر پايداري و بازده حرارتي و توليد آلايندگي، محدوده عملكردي متفاوتي دارند. همانطور كه پيداست براي اينكه مشعل بتواند در هر سه پارامتر مذكور داراي عملكرد مناسبي باشد، مستلزم كاركرد در نسبت هم‌ارزي مناسبي براي هر توان خروجي است تا پايداري، راندمان بالا و آلايندگي مجاز حفظ شود. بنابراين نقشه عملكرد ناحيه‌اي بر حسب نسبت هم‌ارزي و توان خروجي تهيه خواهد شد كه شرايط پايداري، بازده حرارتي و آلايندگي را نشان دهد. بخشی از این اطلاعات مبتنی بر روش‌های غیرتماسی و آنالیز نورتابی شیمیایی حاصل از شعله بوده است که استفاده از این روش در کشور پیشینه چندان زیادی ندارد. بر همین اساس این نوع مشعل نسل جديد (شعله سطحي) در شش توان مختلف از 11.34 تا 16.56کیلووات مورد ارزیابی قرار گرفت و محدوده نسبت هم ارزی 0.85 بازه مناسب کارکرد این نوع سرمشعل شناخته شد. نتايج اين مطالعه براي تنظيم مشعل هاي حرارتي هم در بخش خانگي و هم در بخش صنعتي توسط تکنسین‌ها یا مهندسین حوزه تاسیسات حرارتی کاربرد دارد.

**کلی**د‌واژگ**ان**

احتراق، مشعل شعله سطحی، دیگ‌های چگالشی، نقشه عملکرد مشعل، نورتابی شیمیایی

Experimental investigation of surface flame burner of condensing boiler and performance map extraction

Seyed Ali Ghazanfari1\*, Mohammad Behzadi Saroukolaei2, Mohammed Reza Aligodarz3\*, Mohammad Behshad Shafii4 , Mohammad Zabetian Taraghi5

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

4- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

5- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares, Tehran, Iran

\* Tehran, Iran, [s.alighazanfari@gmail.com](mailto:s.alighazanfari@gmail.com)

\*Tehran, Iran, [Maligoodarz@yahoo.com](mailto:Maligoodarz@yahoo.com)

Abstract

In this study, the surface flame premixed burner used in condensing boilers was investigated. Burners have different operating ranges in terms of stability and thermal efficiency and pollution production in different operating conditions. Therefore, in order for the burner to have a proper performance in all three mentioned parameters, it requires performance in a suitable equivalence ratio for each output power to maintain stability, high efficiency and allowable pollution. The regional performance map will be prepared in terms of equivalence ratio and output power to show the conditions of stability, thermal efficiency, and pollution. Part of this information is based on non-contact methods and chemiluminescence of flame, which has little history in the country. Accordingly, this type of new generation burner (surface flame) was evaluated in six different powers from 11.34 to 16.56 kW and the equivalence ratio of 0.85 was recognized as suitable for the operation of this type of burner. The results of this study are used to regulate heat burners in both domestic and industrial sectors by technicians or engineers in the field of HVAC. It is also possible to use the performance map of this research to build a dynamic system for regulating the working conditions of this type of new generation burners (surface flame).

Keywords

Combustion, Surface flame Burner, Condensing Boiler, Chemiluminescence

1. مقدمه

مشعل دستگاهی است که مقدار مشخصی از هوا و سوخت را در یک فضای کنترل شده با هم ترکیب می‌نماید و انرژی سوخت را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کند در اثر این فرآیند مقداری گاز حاصل از احتراق نیز تولید می‌شود. این انرژی تولید شده توسط دو روش جابه‌جایی و تشعشع به محیط اطراف انتقال داده می‌شود. کار اصلی مشعل تولید گرما است؛ یکی از بزرگترین استفاده‌های مشعل در صنعت سیستم‌های گرمایشی به عنوان موتور احتراق بویلرها است. در انواع دیگ‌ها، مشعل‌هایی با ظرفیت کاری متفاوت استفاده می‌شود. طرز کار مشعل بدین شکل می‌باشد که با پاشش سوخت (گاز، گازوییل، مازوت) از طریق ورودی و ایجاد جرقه حرارت مورد نیاز را به صورت شعله به داخل محفظه احتراق هدایت می‌کند.

امروزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی و خانگی از مشعل ها استفاده می‌شود که در ظرفیت‌های متفاوت از کم برای کاربرد‌های خانگی تا زیاد که در کوره های صنعتی مانند صنایع فولاد و پتروشیمی استفاده می شوند، وجود دارند. در بین کاربرد‌های گوناگون مشعل ها، مکان‌هایی که مصرف سوخت و تولید آلاینده ها مهم هستند پارامترهای احتراقی نقش مهمی پیدا می کنند که با کنترل آن‌ها، نوع و کیفیت احتراق تغییر می کند [1].

مهمترین کمیت های که در احتراق مورد بررسی قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از غلظت گونه‌های شیمیایی، سرعت در جریان‌های احتراقی و دما که با توجه به ارزیابی احتراقی آن روش اندازه‌گیری اهمیت پیدا می‌کند. بنابراین روش‌های تشخیص به دو روش کلی تقسیم می‌شوند، روش اول استفاده از حسگرهای مکانیکی تداخلی برای اندازه‌گیری هستند و روش دوم حسگرهایی می‌باشند که بدون تماس مستقیم مکانیکی استفاده می‌گردند [2]. در سال‌های گذشته تحقیقات بسیاری در زمینه کاهش آلاینده های احتراقی و مصرف سوخت انجام شده است و همگی یک هدف را دنبال می‌کردند که آن هم رفع چالش‌های صنعت از جمله افزایش بازدهی، افزایش استفاده از سوخت های نسل نو و کاهش اثرات زیست محیطی بوده است [2].

1-1- اشاره به مراجع

لی و همکاران‌اش [3] در سال 2011 مشعل سطحی استوانه‌ای را بر روی بستر آزمون مشعل پیش‌آمیخته مورد سنجش قرار داد و نیز با انجام تغییرات بصورت تجربی دریافت که ساختار این نوع مشعل را می‌تواند بهینه کند و آلایندگی و پایداری شعله را برای این ساختار بهینه شده مشخص کرد. یو و همکاران‌اش[4] در سال 2013 مشعل شعله سطحی با سطح متخلخل را با سه جنس و درصد تخلخل متفاوت مورد آزمایش قرار داد. او پایداری و شکل شعله مشعل صفحه‌ای را بررسی کرد و توانست، بهترین نوع مشعل از بین سه نوع مشعلی که مورد سنجش خود قرار داده بود را از لحاظ پایداری و آلایندگی انتخاب کند. براساس این مطالعه هرچه میزان تخلخل بیشتر باشد، سرعت گاز عبوری از آن کمتر و زمان ماندگاری بیشتر و در نتیجه پایداری شعله بیشتر می‌شود؛ ولی اگر سوخت غنی باشد باعث می‌شود سرمشعل داغ و برافروخته شده و در طولانی مدت آسیب ببیند. همچنین اگر تخلخل کمتر شود، پایداری شعله کمتر شده و پدیده‌ی برخاستگی شعله رخ می‌دهد. راقوان و همکاران [5] در سال 2012 مشعل شعله سطحی پیش آمیخته را با هدف آزمایش در نسبت هم‌ارزی‌های خیلی کم مورد آزمایش قرار داد. او پس از طراحی محفظه احتراق، از دوربین حرارتی که در بالای سطح مشعل نصب شده است استفاده کرد. بنابراین توزیع دما در سطح مشعل به خوبی قابل رویت بود. هینداساگری و همکاران [6] در سال 2015 بستر آزمایشی را طراحی کردند، آنها یک دوربین حرارتی را در بالای مشعل قرار دادند تا توزیع انتقال حرارت ناشی از برخورد شعله با صفحه را بررسی کنند. آن‌ها سه نوع آرایش خطی، ستاره و خطی جابه‌جا شده را با فاصله و قطرهای متفاوت مورد بررسی قرار دادند. در نهایت برای آرایش خطی و جابجا شده نتایج خیلی تفاوت ندارد ولی هرچه فاصله سوراخ‌های داخلی سطح مشعل بزرگتر باشد باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. همچنین نتیجه شد، در شرایط یکسان آرایش ستاره مصرف سوخت کمتری را دارد. ژائو و همکاران [7] در سال 2015 بر روی یک مشعل استوانه‌ای کار کردند. ابتدا یک مدل CFD طراحی کردند و مشخصات هندسی شرایط خروجی نازل و قطر آن را مشخص کردند سپس نمونه آزمایشگاهی را ساختند و مشعل را مورد آزمون قرار دادند. آنها تغییر فاصله نازل داخل محفظه مشعل را مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر پایداری شعله، نتایج برای غلظت کربن مونواکسید و ناکس نیز در محدوده‌ی مورد آزمون مناسب بوده است. هدف این مقاله بیش‌تر مطالعه‌ی تاثیر اختلاط بین سوخت و هوا بوده است. نجارنیکو و همکاران [8] در سال 2019 بر روی یک مشعل شعله سطحی استوانه‌ای فعالیت نمودند. آن‌ها با تصویر برداری در شرایط شعله آزاد از سرمشعل (بدون محفظه احتراق) در نسبت هم‌ارزی‌های متفاوت با انجام آنالیز تصویر و رنگ نقشه پایداری سرمشعل را استخراج نمودند. سلطانیان و همکاران [9] در سال 2019 تنها با تکیه بر روش طیف‌سنجی، نقشه عملکردی یک نوع از مشعل شعله سطحی را در شرایط شعله آزاد مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این تحقیق به بررسی دیگر گونه‌های نورتاب در حین فرآیند اشاره کردند.

2- آزمایش

2-1- بستر آزمون

بستر آزمون متشکل از یک محفظه احتراق با ساختار مکعب مستطیل به ابعاد 20\*20\*30 سانتی‌متر می‌باشد که با نصب شیشه کوارتز از دو وجه شرایط تصویر برداری و تحلیل طیفی را از سرمشعل فراهم می‌سازد. علت استفاده از شیشه کوارتز آن است که ضمن مقاومت بالا در برابر حرارت و ضربه، طول موج‌های تابیده شده از شعله را تغییر نمی‌دهد و برای انداز‌گیری با طیف‌سنج خطا ایجاد نمی‌کند. درون محفظه احتراق از یک سر مشعل شعله سطحی استوانه‌ای (Bekaert - Model:Furipat) به قطر 50 میلی‌متر و طول 110 میلی‌متر مطابق شکل 1 استفاده شده است که بر اساس ادعا کارخانه، توانی بین 10 تا 17 کیلووات می‌تواند تولید نماید. برای نزدیک بودن شرایط آزمون به شرایط واقعی کارکرد احتراقی یک دیگ چگالشی، خط سوخت مستقیم به گاز شهری متصل شده است که به وسیله یک عدد شیر توپی، مطابق شکل 2 کنترل می‌شود. در جدول 1 ترکیبات گاز طبیعی بر حسب مول در زمان انجام آزمایش گزارش شده است.

بر همین اساس دبی سوخت از رابطه 1 قابل اندازه‌گیری است [10]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| (1) |  |

که HC توان حرارتی مشعل ، LHV ارزش حرارتی پایین سوخت و Q fuel دبی سوخت می‌باشد. از همین رو دبی هوا نیز از رابطه‌ای بین نسبت‌ هم‌ارزی و دبی سوخت حاصل می‌شود که عبارت است از:

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| (2) |  |

که HC توان حرارتی مشعل ، LHV ارزش حرارتی پایین سوخت، Qair دبی سوخت، چگالی سوخت ، چگالی هوا و نسبت هم‌ارزی می‌باشد.

|  |
| --- |
| ­ |
| **شکل 1** ساختار و ابعاد سر‌مشعل |
| ­ |
| **شکل 2** تجهیزات بستر آزمون [8] |

به جهت جلوگیری از ورود ذرات ریز داخل خط لوله گاز از یک عدد فیلتر گاز استفاده شده و به منظور کنترل نوسانات فشار گاز، یک متعادل‌کننده فشار (Madas-AGP/RC) نصب گردیده است که فشار قبل و بعد آن توسط مانومتر‌های فشار(P1,P2,P3,P4) با محدوده 0 تا 100 میلی بار قابل رویت است. پس از این تجهیز از یک روتامتر گاز با محدوده 0.35 تا 3 مترمکعب بر ساعت (ابزار کنترل ارشیا – مدل ACA02 -15) استفاده شده که پیش از ورود به مخلوط کن سوخت و هوا (شعله صنعت – مدل 120PMG) دبی سوخت را با دقت 0.05 مترمکعب بر ساعت اندازه‌گیری می‌نماید.

خط تامین‌کننده هوا مورد نیاز احتراق نیز توسط یک دمنده هوای مرکزی (ParsCompressor-Model:40GM) با محدوده هوادهی 0 تا 34.5 مترمکعب بر ساعت، تغذیه می‌شود و به منظور کنترل دبی هوا از یک شیر تنظیم و بعد از آن از یک متعادل‌کننده فشار (Madas-FRG/2MT) برای تثبیت فشار ورودی به روتامتر هوا (ابزار کنترل ارشیا – مدل ACA03-25) با محدوده کاری 6.5 تا 45 مترمکعب بر ساعت استفاده شده است که دبی هوا را با دقت 1 مترمکعب بر ساعت پیش از ورود به مخلوط‌کننده هوا و سوخت، اندازه‌گیری می‌نماید.

تنظیم دبی سوخت و هوا توسط شیرهای تنظیمی انجام می‌گیرد. بعد از تنظیم این دبی‌ها از روی روتامتر به صورت چشمی، مقادیر خوانده و ثبت می‌شود. روتامتر در شرایط ترمودینامیکی خاصی طراحی شده و دبی‌های درج شده بر روی آن با توجه به شرایط دمایی و فشار طراحی آن می‌باشد. از طرفی فشار و دمای کاری با مقدار درج شده متفاوت است. با فرض کردن ایده‌آل بودن گاز طبیعی و هوا، می‌توان مقدار دبی در شرایط کاری را از رابطه 3 بدست آورد:

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| (3) |  |

Qr دبی سیال در دمای Tr و فشار Pr مقادیر دما و فشار طراحی روتامتر می‌باشند. Tc و Pc دما و فشار کاری خط می‌باشند. از این رو مقدار توان واقعی و نسبت‌ هم‌ارزی طبق شرایط ترمودینامیکی از رابطه 4 و 5 محاسبه می‌شود.

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| (4) |  |
|  | |
| (5) |  |

**جدول 1** درصد مولی ترکیبات گاز شهری

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ترکیبات و مشخصات فیزیکی | واحد اندازه گیری | مقدار |
| متان (CH4) | Mol% | 90.7 |
| اتان (C2H6) | Mol% | 2.8 |
| پروپان (C3H8) | Mol% | 0.7 |
| نیتروژن (N2) | Mol% | 4.3 |
| دی اکسید کربن (CO2) | Mol% | 0.9 |
| غیره | Mol% | 0.6 |
| چگالی نسبی (sp.G) |  | 0.62 |
| ارزش حرارتی پایین (LHV) | kJ/m3 | 37260 |

به منظور ارزیابی نورتابی شیمیایی حاصل از فرآیند احتراق در این پژوهش از یک دستگاه طیف سنج با محدوده 200 تا 1100 نانومتر مطابق جدول 2 استفاده شده است و به واسطه یک فیبر نوری، اطلاعات نوری حاصل از احتراق را دریافت می‌نماید. از این تجهیز به منظور اندازه‌گیری شدت تابش گونه احتراقی OH\* استفاده شده که این گونه نماینده حرارت آزاد شده شعله می‌باشد چرا که این گونه نورتاب، زنجیره واکنش‌های پیش‌رونده و دما بالا را فعال می‌سازد و براین اساس می‌توان محدوده حرارت زایی سرمشعل را به روش غیرتداخلی تشخیص داد.

**جدول 2** اطلاعات دستگاه طیف‌سنج

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| مشخصات | واحد اندازه‌گیری | مقدار |
| محدوده طول موج | نانومتر | 1100-200 |
| حد تفکیک | نانومتر | 1.8 |
| تعداد پیکسل | عدد | 3648 |
| اندازه پیکسل | میکرومتر | 200 \* 8 |
| نسبت سیگنال به نویز | عدد | 800:1 |
| محدوده زمان نوردهی | میکروثانیه - ثانیه | 10-60 |

همچنین از دو دوربین دیجیتال (Alhua CCD Camera – Model: DH-IPC-HFS5431EP-H ) برای تصویر برداری از شعله از نمای روبرو و جانب، جهت تشخیص پایداری و رفتار شعلک‌ها استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری دما و تحلیل موازی دما با اطلاعات طیف‌سنجی، با توجه به اینکه دمای شعلک‌ها در نزدیک سطح سر مشعل در حدود 1600-1400 درجه

سلسیوس می‌باشد از ترموکوپل نوع B برای سنجش دما در نزدیک سطح شعله استفاده شده است.

برای سنجش میزان گونه های محصولات احتراق نیز از یک دستگاه تحلیلگر گاز Testo 350 استفاده شده است. حسگر این تحلیلگر گاز در معرض گاز‌های خروجی از دودکش قرار داده شد و تا تثبیت میزان پارامتر‌‌های مورد نظر، اندازه‌گیری ادامه یافت.

3- نتایج

3-1- نتایج مربوط نورتابی شیمیایی

برای شدت تابش ، سوخت را در دبی‌های 1.1، 1.2، 1.3، 1.4، 1.5 و 1.6 متر مکعب بر ساعت در هر مرحله، ثابت نگه داشته و با تغییر دبی هوا در توان‌های متناظر با دبی سوخت، طیف‌سنجی انجام شده است. طی این اندازه‌گیری به موجب دریافت تنها نورتابی شیمیایی ناشی از احتراق در دو مرحله، ابتدا از محیط بدون روشن بودن سرمشعل و بار دیگر از سرمشعل بلافاصله پس از خاموشی، طیف‌ تابشی دریافت شده و مقادیر این دو مرحله از طیف تابشی دریافتی حین کار کرد سرمشعل کسر گردیده است تا اثرات شدت نور‌های پیرامون فضای آزمایش و شدت تابش ناشی از گرم شدن سرمشعل در داده‌ها وارد نشود.

توان مشعل وابسته به دبی سوخت است بنابراین محدوده توان‌های اندازه‌گیری شده شامل 11.39، 12.42، 13.46، 14.49، 15.53 و 16.56 کیلووات می باشد. که با توجه به شکل 3 می توان گفت بیشترین حرارت آزاد شده در محدوده نسبت هم‌ارزی 0.85 اتفاق می افتد چرا که بیشترین میزان تابش این گونه در این محدوده اتفاق می‌افتد.

|  |
| --- |
| C:\Users\Ali\Desktop\مقاله\OH1.wmf­ |
| **شکل 3** مقادیر شدت تابش گونه OH\* بر حسب نسبت‌هم‌ارزی در توان‌های مختلف |

همچنین در شکل 4 مقادیر نرمال شده گونه نورتاب به توان مشعل برحسب نسبت هم‌ارزی‌های مختلف گزارش شده است. این درحالی است که این نمودار مستقل از توان مشعل بوده و لذا میزان شدت تابش این گونه یا درواقع حرارت آزاده شده در نسبت های هم ارزی مختلف را نشان می دهد. لذا بشینه مقدار در این نمودار نسبت هم ارزی مناسب مشعل را برای بیشینه حرارت آزاد شده نمایان می‌سازد که چون مستقل از توان است می‌توان آن را برای دیگر ابعاد این نوع سرمشعل نیز تعمیم داد.

|  |
| --- |
| C:\Users\Ali\Desktop\مقاله\OHPower.wmf­ |
| **شکل 4** مقادیر نرمال شده شدت تابش گونه OH\* به توان‌ مشعل بر حسب نسبت‌هم‌ارزی در توان‌های مختلف کاری |

مهم ترین نکته قابل استنباط از این نمودار این است که بیشینه حرارت آزاد شده از مشعل در نسبت هم‌ارزی های کوچک‌تر از یک می‌باشد، که این موضوع مشعل شعله سطحی را تبدیل به یک تکنولوژی رقیق‌سوز کرده است.

**3-2- نتایج مربوط به آلاینده‌های احتراقی**

گاز کربن مونواکسید با احتراق ناقص ایجاد می‌گردد و از آلاینده های سمی و خطرناکی هستند که باید تحت کنترل باشد. علاوه بر آن اکسیدهای نیتروژن هم که مهم‌ترین آن‌ها در مشعل‌های خانگی هستند جز آلاینده‌های پرخطر محسوب می‌شوند. در دماهای بالا تولید می‌شود و تولید آن در دماهای زیر 1800 درجه سلسیوس ناچیز است.

اندازه‎گیری آلاینده CO, NOx بوسیله تحلیل‌گر گاز تستو انجام شده است. این مشعل به علت کارکرد در دمای پایین و رقیق سوز بودن، میزان بیشینه تولید اکسید‌های نیتروژن آن ppm 14.3 بوده که این مقدار در محدوده حد مجاز استاندارد قرار دارد [11] (شکل 5). تولید آلاینده مشعل در شکل 6 نشان داده شده است، بر اساس این نمودار در نسبت هم‌ارزی‌های پایین، تولید به علت احتراق ناقص زیاد است. اما با افزایش نسبت هم‌ارزی، تولید کم می‌شود. با عبور از نسبت هم‌ارزی استوکیومتریک، مجددا احتراق ناقص داریم که باعث افزایش ناچیز تولید می‌گردد. چون در گستره بالاتر از استوکیومتری، هوا کافی برای انجام واکنش‌های احتراقی وجود ندارد. طبق بررسی صورت گرفته در استانداردها مقادیر مجاز آلاینده های مهم برای موتورخانه های ساختمان های غیرصنعتی، مقدار مجاز برای آلاینده کربن مونواکسید اندازه‌گیری شده توسط دستگاه تحلیلگر تستو ppm 82 و مقدار مجاز برای اکسیدهای نیتروژن(NOx) ppm 85 می‌باشد[11]. بنابراین میزان تولید تنها در نسبت هم‌ارزی 0.54 به بالا قابل قبول است.

|  |
| --- |
| C:\Users\mohammad\Desktop\qaz\file02.wmf  ­ |
| شکل 5 میزان تولید آلاینده اکسید‌های نیتروژن بر حسب نسبت‌ هم‌ارزی در توان‌های مختلف |
| file03  ­ |
| شکل 6 میزان تولید آلاینده کربن منواکسید بر حسب نسبت‌ هم‌ارزی در توان‌های مختلف |

**3-3- نتایج مربوط به دماسنجی**

طبق توضیحاتی که پیشتر ارائه گردید اندازه‌گیری دما شعلک‌ها توسط ترموکوپل نوع B صورت گرفت که این اندازه‌گیری شامل دو بخش بوده است. در بخش اول با توجه به نوسانات سریع شعلک ها برای آن که دمای ثبت شده از لحاظ عدم قطعیت به بهترین شرایط ممکن برسد، در این پژوهش ترموکوپل توسط یک پایه نگهدارنده در شرایط ثابت و بسیار نزدیک به سر مشعل(5 میلیمتر) قرار گرفت تا بتوان در شرایط ایده آل کارکرد مشعل (محدوده نسبت هم ارزی 0.85)، یعنی زمانی که شعلک ها به سطح سرمشعل چسبیده اند، دمای لبه واکنشی شعلک ها را اندازه گرفت، بدیهی است که این روش در محدوده‌ای که شعله به سرمشعل چسبیده است از دقت بالاتری برخوردار است چون به علت عدم تغییر موقعیت ترموکوپل و پایدار شدن شعلک‌ها نوسانات دمایی اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل به حداقل می‌رسد اما با تغییر نسبت هم‌ارزی و ارتفاع گرفتن شعلک‌ها و تغییر موقعیت لبه واکنشی شعله، دما‌های اندازگیری شده به شدت افت می‌نماید (شکل 7). به همین منظور در بخش دوم تنها در سه توان مختلف تلاش شد به صورت دستی ترموکوپل را طوری ثابت نگه‌ داشت که با تغییر نسبت هم‌ارزی و همچنین تغییر موقعیت لبه واکنشی شعله، ترموکوپل دمای لبه واکنشی را اندازه‌گیری نماید. این اندازه گیری موجب شد تا روند تغییرات دمایی لبه واکنشی شعله نمایان شود (شکل 8). اما در بخش یک، دمایی دقیق از بیشینه دمای مربوط به لبه واکنشی شعله در شرایط کارکرد ایده آل ارائه گردید که بر اساس شکل 9 (ب) پیوستگی شعلک‌ها در این بازه نسبت هم‌ارزی که معین شرایط شعله سطحی است، سطحی یک دست با دما بالا و میزان حرارت‌زایی بالا را ایجاد می‌نماید.

|  |
| --- |
| C:\Users\Ali\AppData\Local\Temp\Rar$DRa1324.9800\file04.wmf |
| شکل 7 دما‌های حاصل از لبه واکنشی به صورت اندازه‌گیری ثابت |
| file05 |
| شکل 8 دما‌های حاصل از لبه واکنشی به صورت اندازه‌گیری متحرک |

**-4-1- حد خاموشی پایین**

منظور از حد خاموشی پایین، کمترین نسبت هم‌ارزی است که در آن شعله رو به خاموشی می‌رود. شعله در مرز خاموشی به شدت ناپایدار است و کمترین جریان هوای اضافی می‌تواند مشعل را خاموش کند. رقیق شدن بیش از حد مخلوط سوخت و هوا، علت خاموشی شعله است.

در شکل 9 (د) تصویر شعله که در مرز خاموشی پایین قرار دارد در دو نمای مختلف نشان داده شده است. در تمام توان‌ها، خاموشی در محدوده نسبت هم‌ارزی 0.4 رخ می‌دهد.

**3-4-2- بررسی تصاویر شعله جهت تعیین پایداری**

برای هر یک از تصاویری که در یک توان و چند نسبت هم‌ارزی از شعله گرفته می‌شود می‌توان تحلیلی را بیان کرد اما از بررسی ها می‌توان دریافت که با تغییر توان، تحلیل ها و نتیجه برای تصاویر هر توان تقریبا مشابه توان قبلی است و فقط در هر نسبت هم‌ارزی باهم متفاوت اند. به طور نمونه در شکل 9 (الف) شعله در مخلوط غنی و نزدیک به حالت استوکیومتری خودش به رنگ سبز مایل به آبی (فیروزه‌ای) می‌باشد. که در این موقعیت شاهد ناپایداری و فاصله زیاد شعلک‌ها از سرمشعل هستیم. با افزایش دبی هوا در دبی گاز ثابت، نسبت هم‌ارزی کم می‌شود. با کاهش نسبت هم‌ارزی به سمت یک و حتی کم‌‌تر از یک، شعله به رنگ زرد، نارنجی و قرمز در‌ تا توان 14.4 کیلووات در می‌آید. در این حالت شعله پیش از خروج از سرمشعل به علت سرعت کم دبی هوا‌، تشکیل می‌شود و موجب سرخ شدن سطح سر مشعل در طولانی مدت می‌شود که بنابر اعلام سازنده این شرایط باعث آسیب دیدن سرمشعل می‌گردد. به مرور با زیاد کردن دبی هوا و کاهش نسبت هم‌ارزی، شعله به رنگ آبی میل می‌کند (شکل 9 (ب)) و با تداوم این موضوع و افزایش سرعت جریان خروجی از سوراخ‌های مشعل، برخاستگی آغاز می‌شود (نسبت هم‌ارزی 0.6). برخاستگی عموما به علت عدم توازن بین سرعت مخلوط ورودی به مشعل و سرعت سوختن شعله است (شکل 9 (ج)). با افزایش تدریجی دبی هوا در نسبت هم‌ارزی 0.51، ناپایداری در شعله بیش‌تر شده و نهایتا خاموشی کمی پایین تر از نسبت هم‌ارزی 0.46 اتفاق می‌افتد (شکل 9(د)) .

|  |  |
| --- | --- |
| الف (محدوده شعله فیروزه - شرایط ناپایدار) | |
|  |  |
|  | |
| ب (محدوده شعله آبی – شرایط ایده‌آل) | |
|  |  |
|  | |
| ج (محدوده بلندشدگی شعله) | |
|  |  |
|  | |
| د (آستانه خاموشی وزشی) | |
|  |  |
|  | |
| **شکل 9** تضاویر مربوط به شعله، سمت راست: نمای روبرو، سمت چپ: نمای جانبی | |

**3-5- نقشه پایداری مشعل**

با توجه به توضیحات بالا و بررسی های انجام شده روی تصاویر مشعل، می­توان تعریف خوبی از گستره پایداری مشعل بیان کرد. نمودار حاصل از تحلیل ها برای پایداری به صورت شکل 10 است که از شش ناحیه تشکیل می‌شود. ناحیه اول از بالا، ناحیه­ی بروز شعله­ی فیروزه­ای است که در آن شعله ناپایدار و برخاسته از سرمشعل داریم.

ناحیه دوم، ناحیه­ی شعله­ی زرد و قرمز است. ازآنجا که چشم انسان تشعشعات فروسرخ را به رنگ قرمز می­بیند به این حالت از شعله، زرد تشعشعی گفته می­شود و در برخی نواحی تشعشعات فروسرخ نیز دارد. در توان های کم ،سرعت سوختن بیش­تر از سرعت مخلوط اولیه سوخت و هواست؛ چون در توان های کم دبی مخلوط نیز پایین است. به همین دلیل شعله به سطح می­چسبد و باعث برافروختگی سطح سرمشعل می‌شود. هرچه ظرفیت حرارتی افزایش می­یابد، دبی مخلوط نسوخته هم زیاد می‌شود؛ بنابراین سرعت مخلوط از سرعت سوزش بیش­تر می­شود و موجب می‌گردد شعله از سطح سرمشعل فاصله بگیرد و برافروختگی سطح کم و تا حدودی برطرف گردد. به همین علت است که با افزایش توان حرارتی، محدوده­ی شعله­ی زرد تشعشعی کوچک­تر شده و به مرور از بین می­رود.

ناحیه سوم، که مهمترین محدوده در بین محدوده‌های دیگر است، ناحیه­ی شعله­ی آبی پایدار می­باشد. پایدارترین حالت شعله­ی پیش­آمیخته در بین محدوده این دو خط قرار دارد. در این حالت تعادلی بین سرعت مخلوط نسوخته و سرعت سوزش برقرار می‌شود؛ به طوری که شعله به صورت مناسبی به سطح سر مشعل چسبیده و نه خیلی از سطح جدا شده است. از نمودار پایداری می­توان نتیجه گرفت که حالت پایدار این نوع مشعل شعله سطحی استوانه­ای در توان های آزمایش شده، بین محدوده نسبت هم­ارزی 0.79 تا 0.95 واقع شده است.

ناحیه چهارم، ناحیه­ی برخاستگی شعله تا خط خاموشی وزشی است. شروع برخاستگی شعله از لبه­های ابتدایی و انتهایی سرمشعل استوانه­ای است. در حالت شعله­ی آبی پایدار نیز در قسمت­هایی از سرمشعل به صورت موضعی برخاستگی اتفاق می‌افتد اما این شرایط بصورت ناپایدار اتفاق می‌افتد و به نظر می‌آید با درز بندی کامل محفظه احتراق این مورد برطرف گردد. در این پژوهش زمانی که شعله در لبه­ی انتهایی مشعل به طور کامل شروع به برخاستن ­کند، پدیده­ی برخاستگی گزارش شده است. با افزایش توان، شروع برخاستگی شعله به نسبت هم­ارزی بالاتر منتقل میگردد . این موضوع هم به علت افزایش سرعت مخلوط نسوخته و زیاد شدن آن نسبت به سرعت سوزش رخ داده است.

ناحیه پنجم، حد مجاز آلاینده کربن منواکسید است که برای بار نخست در نقشه عملکرد این نوع سرمشعل گزارش شده که با تنظیم نسبت هم‌ارزی در محدوده بالاتر از این خط، کارکرد این مشعل در محدوده استاندارد است. این خط نماینده حد مجاز 82 ppm میزان تولید کربن منواکسید است که به عنوان هشداری در تنظیم احتراق این نوع سرمشعل قابل استفاده است.

ناحیه ششم خط خاموشی وزشی پایین شعله­ی پیش­آمیخته می­باشد. در واقع کم­ترین نسبت هم­ارزی که مشعل مشتعل و روشن باقی می­ماند. در تمام ظرفیت­ها حد خاموشی پایین در حدود 0.46 است. اما باید توجه داشت که میزان تولید آلاینده کربن منواکسید در این محدوده بالاتر از حد مجاز استاندارد می‌باشد.

|  |
| --- |
| C:\Users\Ali\AppData\Local\Temp\Rar$DRa10168.33334\end.wmf |
| **شکل 10** نقشه عملکردی مشعل |

4- فهرست علایم

|  |  |
| --- | --- |
|  | فشار (mbar) |
|  | دبی حجمی (m3/hr) |
|  | دما (K) |
|  | سرعت (ms-1) |
| **علایم یونانی** | |
|  | نسبت هم ارزی |
|  | چگالی (kgm-3) |
| **بالانویس­ها** | |
|  | توان حرارتی |
|  | ارزش حرارتی پایین سوخت |
| **زیرنویس­ها** | |
|  | هوا |
|  | سوخت |
|  | شرایط مرجع |

5- مراجع

[1] A. Fazel , P. Ebrahimi ,Application reference of industrial hot water and steam boilers. (in Persianفارسی )

[2] C. E. Baukal and J. Charles E.Baulkal, INDUSTRIAL COMBUSTION. Taylor & Francis, 2011

[3] S. Lee, S.-M. Kum, and C.-E. Lee, "An experimental study of a cylindrical multi-hole premixed burner for the development of a condensing gas boiler," Energy, vol. 36, no. 7, pp. 4150-4157, 2011.

[4] B. Yu, S.-M. Kum, C.-E. Lee, and S. Lee, "Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners," Energy, vol. 53, pp. 343-350, 2013

[5] V. Raghavan, "Experimental Study of Pre-mixed Flames on a Multi-Hole Matrix Burner," International Journal of Integrated Engineering, vol. 4, no. 1, 2012.

[6] V. Hindasageri, P. Kuntikana, R. P. Vedula, and S. V. Prabhu, "An experimental and numerical investigation of heat transfer distribution of perforated plate burner flames impinging on a flat plate," International journal of Thermal sciences, vol. 94, pp. 156-169, 2015

[7] D.-F. Zhao, F.-G. Liu, X.-Y. You, R. Zhang, B.-L. Zhang, and G.-L. He, "Optimization of a premixed cylindrical burner for low pollutant emission," Energy Conversion and Management, vol. 99, pp. 151-160, 2015.

[8] Najarnikoo, Mahdi, Mohammad Zabetian Targhi, and Hadi Pasdarshahri. "Experimental study on the flame stability and color characterization of cylindrical premixed perforated burner of condensing boiler by image processing method." Energy 189 (2019): 116130.

[9] Soltanian, Hossein, Mohammad Zabetian Targhi, and Hadi Pasdarshahri. "Chemiluminescence usage in finding optimum operating range of multi-hole burners." Energy 180 (2019): 398-404.

[10] S. R. Turns, An introduction to combustion. McGraw-hill New York, 1996.

[11] Behine Sazan Sanat Tasisat Co., "Study of environmental pollutants in HVAC system", 2019 (in Persianفارسی )