

تشخیص گونه‌های احتراقی مهم به کمک طیف‌سنجی تابش طبیعی شعله در مشعل سوراخ‌دار

 حسین سلطانیان¹، محمد ضابطیان طرقي^{2*}، هادی پاسدار شهری³

 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 2، 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 * تهران، صندوق پستی 14115111، zabetian@modares.ac.ir

چکیده

در این پژوهش تشخیص گونه‌های احتراقی در شعله متان- هوا بر مبنای طیف‌سنجی تابشی شعله مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه تجربی روی یک دستگاه آزمون که مجهز به وسایل اندازه‌گیری جهت دریافت تابش شعله از مشعل سوراخ‌دار است، انجام شده که یکی از متداول‌ترین مشعل‌ها در دیگ‌های چکالشی است. گونه‌های احتراقی OH^* ، CH^* ، C_2^* ، H_2O^* از روی نورتابی شیمیایی شناسایی شده‌اند. تغییرات شدت تابش گونه OH^* که نقش مهمی در تعیین نرخ حرارت آزاد شده از شعله دارد، برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف Φ و به ازای توان‌های مختلف مشعل به کمک طیف‌سنج اندازه‌گیری شد که بیشترین شدت را در محدوده $0.77 < \Phi < 0.85$ در تمامی مقادیر توان مشعل ارائه می‌دهد. به همین ترتیب شدت فرآورده اصلی احتراق H_2O^* بررسی شد که بیشترین مقدار آن که معرف کامل‌ترین حالت واکنش احتراق است در $\Phi = 0.86$ حاصل شد. نتایج همان آزمون نشان داد که نسبت شدت OH^*/CH^* به صورت مستقل از توان مشعل به دست آمد که توسط سایر محققین نیز تأیید شده است. به این ترتیب می‌توان با سنجش تابش شعله نسبت هم‌ارزی آن را به دست آورد. از یک دماسنج مادون قرمز جهت اندازه‌گیری دمای سطح مشعل استفاده شد. دمای بیشینه سطح مشعل در توان‌های مختلف آن به کمک دماسنج لیزری در مقادیر $415^\circ C$ تا $420^\circ C$ به دست آمد. مقادیر بیشینه دما همگی مربوط به نسبت هم‌ارزی $\Phi = 0.83$ بوده و معرف بازدهی بهتر مشعل است. به دست آوردن نسبت هم‌ارزی مشعل از روی تابش آن و امکان بهبود بازده مشعل از طریق ارزیابی شاخص‌های مرتبط با نرخ حرارت آزاد شده و دمای سرمشعل اساس کار کنونی است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 21 دی 1396
 پذیرش: 07 اسفند 1396
 ارائه در سایت: 30 فروردین 1397
 کلید واژگان:
 طیف‌سنجی
 گونه‌های احتراقی
 نورتابی شیمیایی
 سرمشعل سوراخ‌دار
 دما

Important combustion species detection by flame natural emission spectroscopy in perforated burner

 Hossein Soltanian¹, Mohammad Zabetian Targhi^{1*}, Hadi Pasdarsahri¹

 1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
 * P.O.B. 14115111 Tehran, Iran, zabetian@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 11 January 2018
 Accepted 26 February 2018
 Available Online 19 April 2018

Keywords:

Spectroscopy
 combustion species
 chemiluminescence
 perforated burner
 temperature

ABSTRACT

In the present research, combustion species detection in methane/air flame is carried out based on Flame Emission Spectroscopy (FES). Experimental investigation is performed on a test rig equipped with measurement devices to get the flame emission of a perforated burner which is one of most popular burners used in condensation boilers. Combustion species H_2O^* , OH^* , CH^* and C_2^* are detected from their chemiluminescence. The emission of OH^* radical was investigated for different equivalence ratios (Φ) and burner powers showing an intensity peak in the range of Φ between 0.77 to 0.85 that corresponds to the maximum heat release rate. Emission of H_2O^* was also investigated leading to its maximum at $\Phi = 0.82$ which shows the most complete combustion equation for different burner powers. The similar experiment showed that OH^*/CH^* intensity ratio was independent of burner power as is confirmed by previous researchers. One could infer equivalence ratio from the flame emission. Burner surface temperature was also targeted by an infrared thermometer with the purpose of finding the maximum surface temperature of 415 to 420°C which happened at nearly $\Phi = 0.83$ for all burner powers. Finding equivalence ratio of the burner by using its natural emission and improving its efficiency by the method of investigating combustion specifications relating to heat release rate is the basis of this work.

1- مقدمه

با حد تفکیک مناسب قابل انجام است [1]. به همین جهت روش‌های تجربی گوناگونی برای شناسایی و تشخیص گونه‌ها از جمله روش‌های تداخلی¹ و غیرتداخلی² مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اندازه‌گیری‌های احتراق روش‌های تداخلی به گروهی از روش‌ها اطلاق می‌شود که در آن‌ها حسگر اندازه‌گیری

تابش صادر شده از شعله که به صورت طبیعی و یا حاصل از تحریک آن به کمک یک منبع انرژی خارجی (لیزر) انجام می‌شود و همچنین نور جذب شده به وسیله شعله پایه بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری دما و غلظت گونه‌ها در علم احتراق است که در تعیین دامنه وسیعی از متغیرهای احتراقی

¹ Intrusive Methods

² Non-intrusive Methods

نور تابیده شده به طور مستقیم متناسب با غلظت رادیکال‌های برانگیخته که یکی از نتایج نرخ تشکیل و نابودی آن‌هاست، می‌باشد [7]. شکل 1 طرحی از نور تابیده شده در اثر بازگشت گونه نورتاب از حالت برانگیخته به حالت پایدار را نشان می‌دهد.

بانک داده‌های طیفی مربوط به طیف‌های تابشی گونه‌ها موجود در بخش تشخیص گونه‌هاست که با استفاده از آن‌ها تشخیص گونه‌ها انجام می‌شود. به طور کلی طیف‌های تابشی به دو شکل طیف تابش گرمایی (ناشی از تشعشع برانگیختگی به دلیل دمای بالای گونه‌ها) و طیف تابشی نورتابی شیمیایی گونه‌ها (ناشی از برانگیختگی گونه‌ها به دلیل شرکت آن‌ها در واکنش‌های شیمیایی) تقسیم می‌شوند. در این مقاله طیف ناشی از نورتابی شیمیایی مورد نظر است.

تحقیقات با استفاده از این روش‌ها از دهه 90 میلادی در حال پیگیری است. سامانیگو و همکاران [8] در سال 1995 تابش CO_2^* را در شعله‌های آرام و معشوش به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که میان تابش CO_2^* و غلظت اتم‌های H رابطه‌ای وجود دارد که آن را ناشی از تعادل میان گونه‌های O, CO و H دانستند، همچنین دریافتند افزایش تابش CO_2^* نشان‌دهنده افزایش تزیق سوخت و تولید حرارت است. در سال 2000 کوچیما و همکاران [9] به بررسی تابش OH^* , CH^* و C_2^* در شعله پیش‌مخلوط متان با هوا در نسبت‌های هم‌ارزی 0.9-1.5 پرداختند. آن‌ها دریافتند رابطه مهمی میان شدت تابش OH^*/CH^* , CH^*/C_2^* و C_2^*/OH^* با نسبت هم‌ارزی در ناحیه واکنش وجود دارد. در سال 2004 هاردالوپاس و اورین [10] به بررسی تابش گونه‌های رادیکالی آزاد و طیف پیوسته CO_2^* در شعله پیش‌آمیخته گاز طبیعی با نسبت هم‌ارزی 0.7-1.3 پرداختند.

در کار آن‌ها تابش OH^* , CH^* و تابش پس‌زمینه CO_2^* به عنوان یک شاخص مناسب جهت بررسی میزان حرارت آزاد شده به دست آمد. طیف تابشی محصولات احتراق در محدوده 350-600 نانومتر شامل پس‌زمینه CO_2^* است که بر آن تابش محلی گونه‌های OH^* , CH^* و C_2^* سوار شده‌اند، همچنین آن‌ها به رابطه مستقیم میان نسبت تابش OH^*/CH^* و نسبت هم‌ارزی اشاره کردند.

پاناتسوس و همکاران [11] در سال 2010 به بررسی نورتابی شیمیایی گونه‌های OH^* , CH^* و C_2^* در شعله پروپان و دیگر سوخت‌ها نظیر ایزواکتان، اتانول و متانول را برای نسبت‌های مختلف هم‌ارزی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که با کم کردن نسبت هم‌ارزی، نسبت تابش OH^*/CH^* نیز کاهش می‌یابد. گونه C_2^* به عنوان نمایان گر نرخ آزادسازی حرارت در احتراق

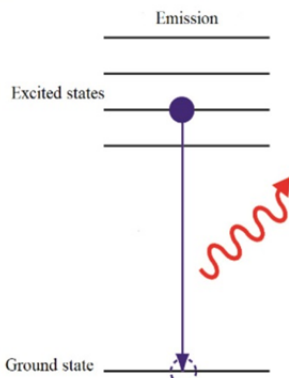


Fig. 1 Emitting light as a result of chemiluminescence

شکل 1 صادر کردن نور در اثر پدیده نورتابی شیمیایی

به طور مستقیم در منطقه اندازه‌گیری مورد نظر قرار می‌گیرد. بارزترین ویژگی نامطلوب حسگرهای اندازه‌گیری تداخلی که تداخل با سیستم اندازه‌گیری در محل اندازه‌گیری غیرقابل اجتناب است [2]. تداخل موضعی به وجود آمده منجر به واکنش‌های ناخواسته در شعله، تغییر در شکل آن و همچنین تغییر در کمیات ترموفیزیکی نظیر دما و غلظت گونه‌ها می‌شود [3]. طیف‌سنجی تابش شعله¹ اساس بسیاری از روش‌های غیرتداخلی است. ظهور طیف‌سنج‌های جدید با تجهیزات آشکارساز سیگنال داخلی در دهه‌های اخیر محققین را بر آن داشته است تا این فناوری را برای نظارت بر عملکرد احتراق شعله‌های مقیاس کوچک و نیز شعله‌های صنعتی با مقیاس بزرگ به کار گیرند [4].

مشخصه‌هایی که عملکرد مشعل با استفاده از آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد شامل توزیع دمای مناسب در سراسر مشعل، غلظت مناسب رادیکال‌ها و گونه‌های مهم که در آزادسازی حرارت مؤثرند، کم بودن غلظت آلاینده‌ها، پایداری شعله از نظر نوسانات زمانی شدت نور آن، توان حرارتی تولیدی زیاد در تنظیم نسبت هوا و سوخت، بالا بودن سهم تشعشع نسبت به جابه‌جایی در انتقال گرمای کلی و پایداری کلی از نظر وجود احتراق در سراسر مشعل بدون برخاستگی² شعله و پس‌زنی³ آن است [5]. در مقاله اخیر تمرکز روی غلظت گونه‌های مهم احتراقی و بررسی نسبت سوخت به هوا با هدف دستیابی به نسبت هم‌ارزی مناسب جهت بهینه بودن نرخ حرارت آزاد شده و بازده مناسب احتراق است.

اندازه‌گیری‌های غیرتداخلی شامل روش‌های غیرفعال⁴ (غیرلیزری) و فعال⁵ (لیزری) است. در این دسته‌بندی روش‌های لیزری با وجود قابلیت اندازه‌گیری دقیق و کاملاً هدفمند نیازمند تجهیزات گران قیمت (مانند لیزر، دوربین‌های با سرعت بالا، عدسی‌ها، فیلترها و نظایر آن) بوده و پیچیدگی اجزا زیادی دارند. طیف‌سنجی تابشی شعله⁶ یک روش غیرفعال حساس به اغتشاشات خارجی است که براساس دریافت تابش از شعله در یک منطقه طیف گسترده از آن عمل می‌کند. از جمله مزیت‌های این روش کم‌هزینه بودن، سادگی کاربرد و مقاومت در برابر اغتشاشات محیطی است [6].

روش طیف‌سنجی تابشی شعله که براساس مشخصات نوری فرآیند احتراق است به عنوان جایگزینی مناسب در اندازه‌گیری‌های مربوط به احتراق نسبت به روش‌های پیشین شناخته می‌شود و به علت سادگی پیاده‌سازی بستر آزمون و ماهیت نوری غیرفعال آن در مقایسه با اندازه‌گیری به کمک لیزر برای کاربردهای تجربی مناسب است [4]. در دو دهه اخیر دسترسی به طیف‌سنج‌های ترکیبی فیبر قابل حمل⁷ این روش را به یک روش مناسب برای مطالعات آزمایشگاهی و همچنین مشعل‌های بزرگ مقیاس صنعتی تبدیل کرده است.

در حالت کلی منابع اصلی تابش شعله ذرات دوده (منجر به تابش به صورت جسم سیاه)، مولکول‌های گاز در دمای بالا و واکنش‌های شیمیایی است که مستقیماً منجر به تولید گونه‌های برانگیخته نورتاب می‌شوند. طول موج تابش این‌گونه‌های نورتاب وابسته به نوع گونه برانگیخته تولید شده از واکنش و همچنین تغییر تراز الکترونی آن در رسیدن به حالت پایدار است که منجر به تابش طول موج مشخصی شده و آن را از سایرین متمایز می‌سازد.

¹ Flame Emission Spectroscopy

² Lift Off

³ Flash Back

⁴ Passive

⁵ Active

⁶ Flame Emission Spectroscopy (FES)

⁷ Portable Fiber Optic Spectrometer

تنظیم‌کننده در مسیر خود و یک رواتر⁶ برای اندازه‌گیری جریان آن دمیده می‌شود. دو دماسنج و دو فشارسنج در هر مسیر برای کنترل این پارامترها پیش از مخلوط استفاده می‌شود. جریان چندجزئی پس از اختلاط به سمت مشعل سوراخ‌دار هدایت و دمای آن با یک دماسنج اندازه‌گیری می‌شود.

روند کلی انجام آزمون به این صورت است که در ابتدا خط گاز و هوا با فشارهای نسبی به ترتیب 16 و 40 میلی‌بار راه‌اندازی شده و با توجه به شکل 2 به مخلوط‌کننده و پس از آن به سرمشعل می‌رسند. ابتدا مقدار دبی حجمی سوخت را تنظیم کرده (معرف توان مشعل) و مقدار دبی هوای ورودی تغییر داده می‌شود. نسبت هم‌ارزی از روی دبی‌های تنظیم شده و ارزش حرارتی سوخت به دست می‌آید. فیبر نوری با استفاده از یک نگه‌دارنده در فاصله 50 سانتی‌متری مقابل شعله و عمود بر مرکز هندسی سرمشعل به منظور دریافت تابش آن نصب شده است. زاویه واگرایی فیبر 0.38 رادیان بوده به طوری که کل تابش مشعل را دریافت می‌کند. فیبر (با قطر 400 میکرون) تابش دریافتی را به طیف‌سنج می‌فرستد. شکل 3 به صورت کلی فاصله و زاویه را نسبت به سرمشعل نمایش می‌دهد.

طیف‌سنج به یک رایانه مجهز است که نمودار شدت برحسب طول موج را با یک نرم‌افزار نصب‌شده بر آن فراهم می‌کند. از یک ورق نسوز با رنگ سیاه به منظور کم کردن نور پس‌زمینه و همچنین ورق گالوانیزه پیرامون کل مشعل جهت جلوگیری از اغتشاش شعله به دلیل عوامل محیطی مانند باد و همچنین کمینه‌سازی نورهای محیطی وارد شده به بستر آزمون استفاده شده است. داده‌های حاصل از طیف‌سنج به ازای هر آزمایش ده مرتبه و در لحظه‌های با فاصله مساوی یک ثانیه ثبت شده و میانگینی از آن‌ها برای هر

سوخت پروپان معرفی شد. در سال 2014 پارامسوارام و همکاران [12] با طیف‌سنجی تابش شعله دمای شعله را اندازه‌گیری کردند. نتایج به دست آمده از محاسبه دما با استفاده از طیف‌سنجی تطابق مناسبی با دمای به دست آمده از دماسنج مرجع داشت. قابلیت اندازه‌گیری دماهای بالای احتراقی به عنوان یکی از نقاط قوت روش استخراج دما با استفاده از طیف تابشی مطرح شد. جاکلین و همکاران [13] در سال 2016 با استفاده از طیف‌سنجی تابش شعله به تعیین عدد اکتان در بنزین پرداختند. آن‌ها به دلیل سادگی، سریع و کم هزینه بودن این روش آن را جایگزین مناسبی برای روش استاندارد مورد استفاده در کنترل کیفیت بنزین خودرو عنوان کردند. جزا و ازتانکو [14] طیف‌سنجی را در مشعل‌های حاوی جریان بخار و هوا انجام دادند. آن‌ها دریافتند گونه C_2^* با افزایش بخار در مشعل کاهش می‌یابد. یافته دیگر آن‌ها در این مقاله آن است که با افزایش فاصله از سرمشعل نسبت شدت‌های OH^*/CH^* و C_2^*/OH^* افزایش و CH^*/C_2^* کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان تابش گونه اصلی CO_2^* را مرتبط با نورتایی شیمیایی در محدوده وسیعی از طول موج (برای نمونه 340-600 نانومتر برای $\Phi=0.55$) دانست. در این مقاله روش طیف‌سنجی تابش شعله به منظور تشخیص گونه‌های احتراقی در یک مشعل سوراخ‌دار¹ پیش‌آمیخته مورد استفاده قرار گرفته و کارایی آن در تعیین محدوده‌های مناسب نسبت هم‌ارزی متناظر با بیشینه بودن دمای سطح سرمشعل و همچنین نرخ حرارت آزاد شده از شعله نشان داده شده است. سرمشعل سوراخ‌دار در کاهش هوای اضافی مورد نیاز برای احتراق و افزایش کارایی مشعل‌ها جزء جدیدترین فناوری‌های ساخت مشعل به حساب می‌آید. در ادامه و در بخش سوم تجهیزات آزمایشگاهی و آزمون‌های طراحی شده معرفی شده و در بخش چهارم نتایج ارائه می‌شود. بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری مقاله اختصاص یافته است.

2- تجهیزات آزمایشگاهی و طراحی آزمایش‌ها

در کار حاضر، یک مشعل سوراخ‌دار استفاده می‌شود که به طور گسترده‌ای در صنایع احتراق (دیگ‌های چگالشی) در این مطالعه استفاده شده است. نصب و راه‌اندازی شامل موارد زیر است: یک دمنده² یک طرفه³ با قدرت 0.75 کیلووات و سرعت زاویه‌ای 2830 دور بر دقیقه، یک مشعل با ظرفیتی در محدوده 10-30 کیلووات و شکل استوانه‌ای با قطر 9 سانتی‌متر و طول 10 سانتی‌متر، طیف‌سنج، شیر کنترل دبی، تنظیم‌کننده فشار، رواتر⁶ هوا و دماسنج دو فلزی که دارای دقت یک درجه سلسیوس و محدوده 0-60 درجه سلسیوس است. فشارسنج دارای دقت یک میلی‌بار و محدوده اندازه‌گیری 0-40 میلی‌بار است و یک مخلوط‌کننده از نوع ونتوری⁴ جهت اختلاط سوخت و هوا استفاده شده است. شیرهای دروازه‌ای⁵ به کار رفته جهت تنظیم دبی سوخت و هوا مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مسیرهای دوگانه‌ای هوا و سوخت در شکل 2 مشخص است که مشخصات دقیق لوله‌کشی خطوط گاز و هوا را نشان می‌دهد. مطابق این شکل گاز طبیعی از یک خط گاز (1) با فشار نسبی 9.65 کیلو پاسکال به مخلوط‌کننده (4) از طریق یک تنظیم‌کننده (2) وارد می‌شود که فشار را تنظیم می‌کند. دبی جریان سوخت پیش از ورود به مخلوط‌کننده با یک رواتر⁶ (3) اندازه‌گیری می‌شود. جریان هوا توسط دمنده (5) به مخلوط‌کننده با

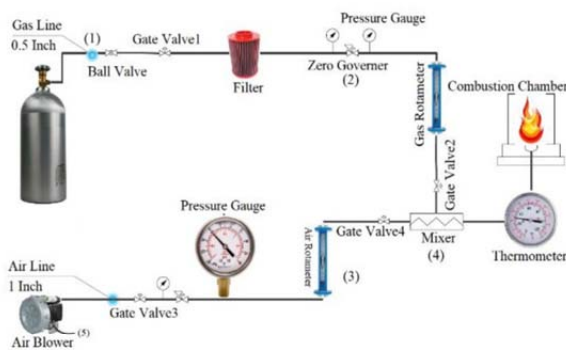


Fig.2 Piping plan of air and gas along with controlling and measurement devices

شکل 2 نقشه مسیر هوا و سوخت به همراه تجهیزات کنترلی و اندازه‌گیری

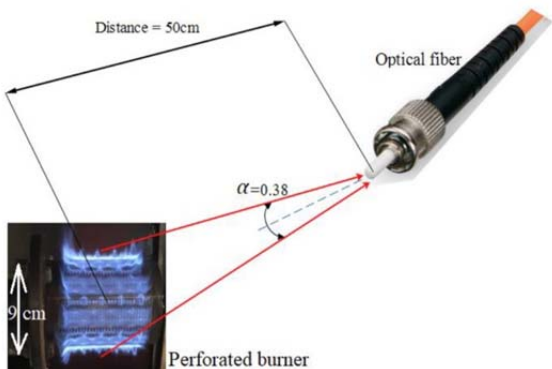


Fig.3 Schematic of optical fiber positioning respect to the burner

شکل 3 طرح‌واره قرارگیری فیبر نوری نسبت به سرمشعل

⁶ Rotameter

¹ Perforated Burner

² Blower

³ Side-channel Blower

⁴ Venturi Mixer

⁵ Gate Valve

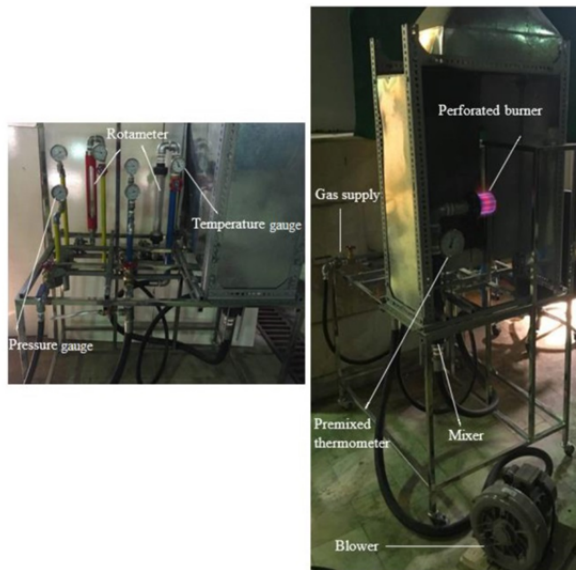


Fig.5 The designed and fabricated test rig of the premixed perforated burner

شکل 5 دستگاه آزمون طراحی و ساخته شده، مربوط به مشعل سوراخ‌دار پیش‌آمیخته

جدول 2 محدوده و دقت اندازه‌گیری طیف‌سنج

Table 2 Range and precision of spectrometer

محدوده	مشخصات
200 - 1100 nm	محدوده طول موج
1.8 nm	حد تفکیک
3648	تعداد پیکسل
8µm × 200µm	اندازه پیکسل
800:1	نسبت سیگنال به نویز
10µs - 60s	محدوده زمان نوردهی

حالت پیش‌آمیخته بوده برای نسبت هم‌ارزی یک (دبی) گاز $1.13\text{m}^3/\text{hr}$ و دبی هوای $10.53\text{m}^3/\text{hr}$ ارائه شده است. بیشینه‌های نمودار مربوط به گونه‌های اصلی نورتاب² شیمیایی در شعله است که شامل OH^* ، CH^* ، C_2^* و H_2O^* است. تابش این گونه‌ها همان‌طور که در شکل نشان داده شده در طول موج‌های 311، 431، 516 و 471 نانومتر رخ داده است [7]. همچنین طول موج 933 نانومتر مربوط به گونه اصلی احتراقی H_2O^* است که فرآورده اصلی احتراق نیز تلقی می‌شود [15].

در شکل 7 تغییرات شدت تابش گونه OH^* برحسب نسبت هم‌ارزی در ظرفیت‌های مختلف مشعل رسم شده است. گونه هیدروکسیل (OH^*) در تعیین نرخ حرارت آزاد شده نقش کلیدی دارد، چرا که زنجیره واکنش‌های دما بالا را فعال می‌کند [5] و به همین دلیل در این بخش تحلیل شده است. همچنین تولید زیاد این گونه تعیین‌کننده آن است که شعله حاصل شده پایدارتر خواهد بود [16]. همان‌طور که در شکل 7 ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت هم‌ارزی شدت گونه OH^* در مقادیر نسبتاً رقیق‌سوز (برای تمامی ظرفیت‌های مشعل) بیشینه است که در محدوده نسبت هم‌ارزی 0.77-0.85 قرار می‌گیرد. مقدار تابش OH^* با افزایش ظرفیت مشعل برای تمامی حالات روند افزایشی را نشان می‌دهد که میزان 45% افزایش از کمترین تا بیشترین

تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته که طی آن تکرارپذیری آزمایش‌ها نیز انجام شده است. در شکل 4 طرح‌واره‌ای از جانمایی اجزاء مختلف چینش آزمون نمایش داده شده است.

توان نامی مشعل 26kW است. در جدول 1 تجهیزات اندازه‌گیری به همراه محدوده‌های آن‌ها به صورت مختصر ارائه شده است. شکل 5 نمایی کلی از دستگاه آزمون ساخته شده مربوط به سرمشعل سوراخ‌دار را نشان می‌دهد. قسمت‌های مختلف دستگاه که پیشتر معرفی شده بودند در شکل مشخص است.

در جدول 2 مشخصات فنی طیف‌سنج مورد استفاده ارائه شده است. حسگر آشکارساز مورد استفاده در طیف‌سنج از مدل TCD1304AP متعلق به شرکت توشیبا¹ است. از ورود نورهای مزاحم اطراف به کمک صفحه مشکی نسوز قرار گرفته در پشت مشعل و همچنین کم کردن نویز پس زمینه در طیف‌سنج جلوگیری شده است. زمان نوردهی روی 10ms تنظیم شده و برای افزایش نسبت سیگنال به نویز انجام شده است. در نرم‌افزار طیف‌سنج از میانگین‌گیری جهت به دست آوردن طیف‌های به دست آمده استفاده شده است. داده‌های آزمایش‌ها در دمای محیط 25 درجه سلسیوس و فشار محیط 88.5 کیلوپاسکال به دست آمده‌اند. مقادیر محاسبه شده نسبت‌های هم‌ارزی برای گاز طبیعی با درصد گازهای 87.7% متان، 4.7% اتان، 1.74% پروپان و 5.86% ترکیب سایر گازها انجام شده است. این درصد گازها و شرایط محیطی مربوط به ماه پایانی تابستان است، همچنین تمام نتایج با سه بار تکرار آزمون در هر مورد به دست آمده که میانگین نتایج آورده شده است.

3- ارائه نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نمونه‌ای از طیف دریافتی از شعله، مستخرج از طیف‌سنج ارائه شده و پس از آن شدت گونه‌های احتراقی و نمودار دمای سطح سرمشعل آورده شده است. در شکل 6 طیف تابشی مربوط به مشعل سوراخ‌دار که در

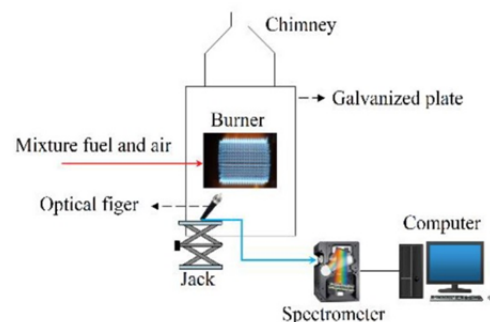


Fig. 4 Schematic of the optical section of the setup

شکل 4 شماتیک بخش نوری تجهیزات چینش آزمون

جدول 1 محدوده و دقت تجهیزات اندازه‌گیری

Table 1 Range and precision of measuring devices

تجهیز	محدوده	دقت
دماسنج مسیر هوا	0-60 °C	±1 °C
دماسنج مسیر گاز	0-60 °C	±1 °C
روتامتر هوا	0.5-45 m ³ /h	±1 m ³ /h
روتامتر گاز	0.3-3 m ³ /h	±0.05 m ³ /h
حسگر فشار مسیرهای گاز و هوا	0-100 mbar	±1 mbar

² Chemiluminescent

¹ Toshiba

با بیشینه مقدار شدت گونه H_2O^* در شعله است که در محدوده $0.85 < \Phi < 0.86$ اتفاق افتاده است و می‌توان آن را برابر با 0.86 برای 0.75% از توان‌های مشعل در نظر گرفت، همچنین تولید بیشتر گونه H_2O^* معرف کامل‌تر بودن فرآیند احتراق است و معیار مناسبی را از این جهت به دست می‌دهد.

آخرین نتیجه در قسمت تشخیص گونه‌ها مربوط به نسبت شدت دو گونه OH^*/CH^* است که نمودار آن مطابق شکل 10 به دست آمده است. همان‌طور که در شکل 10 دیده می‌شود برای توان‌های مختلف مشعل سوراخ‌دار روند کلی نمودار ثابت بوده و حد اکثر خطای نسبی به دست آمده 17% است. به این ترتیب می‌توان نسبت هم‌ارزی مشعل را تنها به کمک دریافت تابش طبیعی شعله آن به دست آورده و جهت تنظیم آن اقدام کرد. تمام داده‌های به دست آمده برای شدت تابش با عدم قطعیت $\pm 10\%$ مقدار گزارش شده و دمای سطح سرمشعل دارای عدم قطعیت $\pm 15^\circ C$ است، همچنین تمام داده‌ها با سه بار تکرار آزمایش و ارائه میانگین جهت اطمینان از تکرارپذیری آزمایش‌ها گزارش شده‌اند.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله طیف تابش طبیعی شعله در سرمشعل سوراخ‌دار به عنوان ابزاری برای تشخیص و اندازه‌گیری شعله به کار گرفته شد به نحوی که تکنیک به کار گرفته شده در خصوص ارزیابی عملکرد مشعل کارایی ویژه‌ای داشته باشد و می‌توان از روی نتیجه اخذ شده نسبت هم‌ارزی مناسب را تشخیص داد و

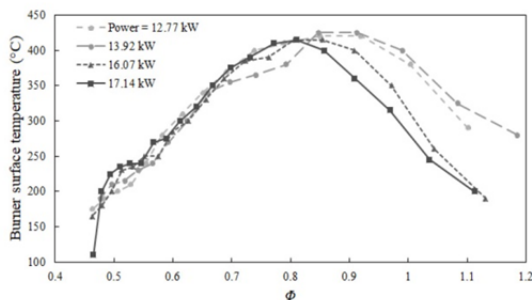


Fig.8 Variation of burner surface temperature as a function of equivalence ratio for different burner powers

شکل 8 نمودار تغییرات دمای سرمشعل با تغییرات نسبت هم‌ارزی و به ازای مقادیر مختلف توان مشعل

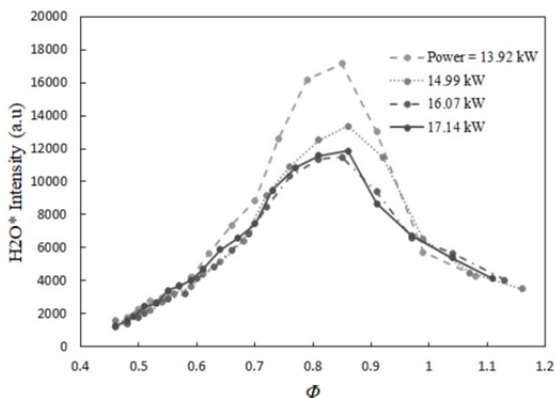


Fig.9 Variation of H_2O^* intensity versus Φ for different burner powers

شکل 9 نمودار تغییرات گونه‌ی H_2O^* با تغییرات نسبت هم‌ارزی و به ازای مقادیر مختلف توان مشعل

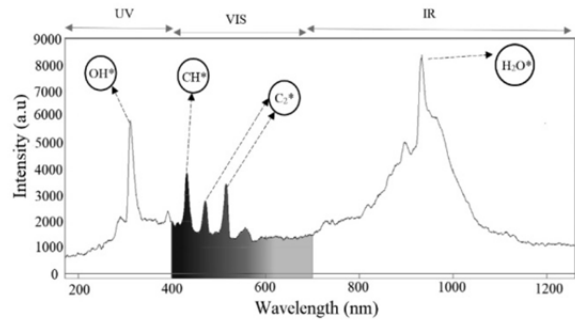


Fig.6 Exported picture of the spectrometer software regarding emission spectrum of perforated burner which shows the graph of emission intensity versus wavelength in equivalence ratio of $\Phi=1.00$ and power of $P=11.74$ kW

شکل 6 عکس خروجی از نرم‌افزار طیف‌سنج مربوط به نمودار طیف تابشی شعله پیش‌آمیخته مشعل سوراخ‌دار که نمودار شدت نور تابشی شعله را برحسب طول موج در نسبت هم‌ارزی $\Phi=1.00$ و ظرفیت مشعل $P=11.74$ kW را نشان می‌دهد.

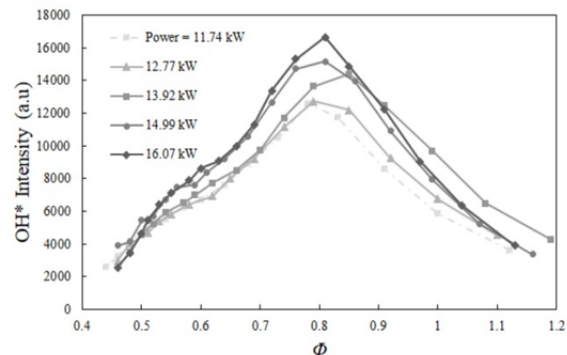


Fig.7 Variation of OH^* intensity versus Φ for different burner powers

شکل 7 تغییرات شدت تابش مربوط به گونه OH^* برحسب نسبت‌های مختلف هم‌ارزی و در ظرفیت‌های مختلف مشعل

ظرفیت (در نسبت هم‌ارزی 0.8) است و این امر حاکی از بالاتر بودن نرخ حرارت آزاد شده از شعله است که به واسطه افزایش مقدار سوخت حاصل می‌شود. بالا بودن شدت گونه OH^* بهبود تداوم و ثبات فرآیند احتراق را به دنبال خواهد داشت. این امر مطابق شکل 5 در $0.77 < \Phi < 0.85$ اتفاق افتاده است. حد پایین نسبت هم‌ارزی ($\Phi=0.45$) نیز حالتی است که در آن شعله در مرز خاموشی (حد اشتعال) قرار می‌گیرد.

شکل 8 نشان‌دهنده تغییرات دمای سطح سرمشعل برای مقادیر مختلف توان مشعل و به ازای تغییرات نسبت هم‌ارزی است (دمای سرمشعل با استفاده از دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری شده و بیشترین مقدار آن بیان‌گر بیشترین بازده احتراق است). این تغییرات به ازای مقدار $\Phi=0.83$ بیشینه مقدار خود به صورت مستقل از ظرفیت مشعل نشان می‌دهد. دو ناحیه در شکل 8 قابل شناسایی است (نسبت‌های هم‌ارزی کمتر از $\Phi=0.83$ و بیشتر از آن) که در ناحیه اول می‌توان تغییرات دما را مستقل از ظرفیت مشعل فرض کرد و تنها با استفاده از دمای آن به نسبت هم‌ارزی پی برد. بر همین اساس تغییرات شدت گونه H_2O^* که یکی از محصولات اصلی احتراق بوده و افزایش تولید آن نشان‌دهنده کامل‌تر بودن فرآیند احتراق است در شکل 9 آورده شده است. بیشترین مقدار این گونه در محدوده نسبت هم‌ارزی $0.85 < \Phi < 0.86$ حاصل شده است.

با مقایسه نمودارهای شکل‌های 8 و 9 مشخص است که بیشینه دمای سرمشعل که به ازای نسبت هم‌ارزی $0.81 < \Phi < 0.85$ اتفاق افتاده است، متناظر

5- فهرست علائم

علائم یونانی	Φ	نسبت هم‌ارزی
	a.u	شدت فرض شده به شکل بی‌بعد (واحد دلخواه)
	α	زاویه واگرایی (rad)
	P	توان (ظرفیت) مشعل (kW)
بالانویس‌ها	*	گونه برانگیخته

6- مراجع

- [1] J. Ballester, T. Garcia, Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, No. 8, pp. 375-411, 2010.
- [2] A. Leipertz, An overview of combustion diagnostics, S. Pfadler, R. Schiebl, *Handbook of Combustion*, pp. 1-50, New York: McGraw-Hill, 2010.
- [3] E. C. Rada, *Thermochemical Waste Treatment by Combustion Gasification and Other Methodologies*, Second Edition, pp. 224-227, New Jersey: Apple Academic Press, 2017.
- [4] C. E. Baukal, *Industrial Combustion Testing*, First Edition, pp. 564-571, London: Taylor & Francis, 2010.
- [5] S. R. Turns, *An Introduction to Combustion Concepts and Applications*, Second Edition, pp. 191-192, New York: McGraw-Hill, 2000.
- [6] A. Labergue, J. D. Penacarrillo, M. Gradeck, F. Lemoine, Combined three-color LIF-PDA measurements and infrared thermography applied to the study of the spray impingement on a heated surface above the Leidenfrost regime, *Heat Mass Transfer*, Vol. 104, No. 2, pp. 1008-1021, 2017.
- [7] J. Ballester, T. Garcia-Armignol, Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, No. 4, pp. 375-411, 2010.
- [8] J. M. Samaniego, F. N. Egofofoluos, C. T. Bowman, CO₂ * chemiluminescence in premixed flames, *Combustion Science and Technology*, Vol. 109, No. 6, pp. 183-203, 1995.
- [9] J. Kojima, Y. Ikeda, T. Nakajima, Spatially resolved measurement of OH*, CH*, and C2* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames, *Combustion Institute*, Vol. 28, No. 6, pp. 1757-1764, 2000.
- [10] Y. Hardalupas, M. Orain, Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescent emission from a flame, *Combustion and Flame*, Vol. 139, No. 3, pp. 188-207, 2004.
- [11] C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas, A. Taylor, Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH* and CH* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames, *Combustion and Flame*, Vol. 156, No. 2, pp. 273-291, 2009.
- [12] T. Parameswaran, R. Hughes, P. Gogolek, and P. Hughes, Gasification temperature measurement with flame emission spectroscopy, *Fuel*, Vol. 134, No. 3, pp. 579-587, 2014.
- [13] J. M. de Paulo, J. E. M. Barros, P. J. S. Barbeira, A PLS regression model using flame spectroscopy emission for determination of octane numbers in gasoline, *Fuel*, Vol. 176, No. 6, pp. 216-221, 2016.
- [14] J. Li, J. Zhao, S. Guo, X. Zhou, Y. Lio, J. Bai, Y. Fang, Predicting the vanadium speciation during petroleum coke gasification by thermodynamic equilibrium calculation, *Fuel*, Vol. 176, No. 6, pp. 48-55, 2016.
- [15] A. G. Gaydon, Second Edition, *The Spectroscopy of Flames*, pp. 211-220, Amsterdam: Springer, 1974
- [16] S. Kadowaki and N. Ohkura, Time series analysis on the emission of light from methane-air lean premixed flames, *Transactions of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 51, No. 173, pp. 133-138, 2008.

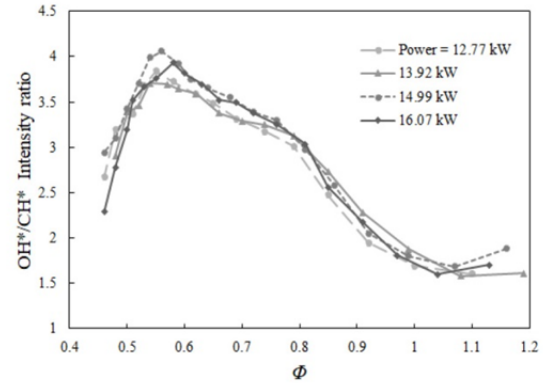


Fig.10 Variation of OH*/CH* intensity ratio versus Φ for different burner powers

شکل 10 نمودار تغییرات نسبت شدت OH*/CH* برحسب نسبت هم‌ارزی در توان‌های مختلف مشعل

همچنین به کمک این روش غیرتماسی می‌توان توزیع دما را به دست آورد که عاملی مهم در محاسبه راندمان شعله است. بر این اساس گونه‌های نورتاب مهم احتراقی در دستگاه مشعل سوراخ‌دار با احتراق پیش‌آمیخته شناسایی شده و تابش آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. بر این اساس تغییرات شدت تابش گونه OH* در سرمشعل سوراخ‌دار برای نسبت‌های مختلف هم‌ارزی و ظرفیت‌های مختلف مشعل به دست آمد که برای مقادیر نسبت هم‌ارزی بین 0.77-0.85 و مستقل از ظرفیت مشعل بیشترین شدت این گونه اندازه‌گیری شد که معرف بالاترین میزان نرخ حرارت آزاد شده از مشعل است. تغییرات تابش یکی از فرآورده‌های اصلی احتراق که گونه‌ی H₂O* است، به ازای تغییرات نسبت هم‌ارزی و برای ظرفیت‌های مختلف مشعل بررسی شد. مقایسه این تغییرات با تغییرات دمای سرمشعل روند مشابهی را نشان داد که ناشی از بالاتر بودن دما در احتراق کامل‌تر (با تولید گونه بیشتر) است. روندی مشابه برای تغییرات این دو کمیت به صورتی است که در آن محدوده نسبت هم‌ارزی 0.83-0.85 معادل بیشینه مقدار تابش فرآورده‌ی احتراقی H₂O* و دمای سرمشعل تعیین شد. دستاورد مهم این مقاله به دست آوردن نسبت هم‌ارزی مشعل سوراخ‌دار مستقل از توان مشعل، بدون دخالت در شعله آن و از فاصله دور است که این امر به کمک دریافت تابش شعله و محاسبه نسبت شدت OH*/CH* حاصل می‌شود. در رژیم‌های احتراقی $0.45 < \Phi < 0.83$ نیز می‌توان نسبت هم‌ارزی را از روی دمای سطح سرمشعل به دست آورد. بدین ترتیب می‌توان مشعل را جهت بهبود مصرف سوخت تنظیم کرده بدون این که به آن نزدیک شویم. مطالعه کنونی ابزاری را به منظور بررسی غیرتماسی ویژگی‌های عملکردی مشعل‌های مورد استفاده در دیگ‌های چگالشی مورد توجه قرار داده است، همچنین روش به کار گرفته شده قابل توسعه به سایر سامانه‌های احتراق صنعتی است.