

## Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(1) (2021) 15-18 DOI: 10.22060/mej.2019.16162.6290



# Experimental Investigation of Combustion Species Radiation to Evaluate Equivalence Ratio in a Surface Flame Burner

H. Soltanian, M. Zabetian Targhi\*, H. Pasdarshahri

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** In the present research, combustion species were investigated in perforated natural gas burner based on flame emission spectroscopy. An experimental investigation is performed on a new burner test rig which is one of the most popular burners used in condensation boilers through a spectrometer-fiber optic to get the flame emission of a perforated burner. Combustion species H<sub>2</sub>O<sup>\*</sup>, OH<sup>\*</sup>, CH<sup>\*</sup>, C<sub>2</sub><sup>\*</sup> and CO<sub>2</sub><sup>\*</sup> are detected from their chemiluminescence The emission of CO<sub>2</sub><sup>\*</sup> which has the main role in heat release rate of burner was investigated for different equivalence ratios ( $\boldsymbol{\Phi}$ ) and burner powers of 11-16 kW showing an intensity peak in the range of  $\boldsymbol{\Phi}$  between 0.78 to 0.85 that corresponds to the maximum heat release rate. Emission of OH<sup>\*</sup> was also investigated being the main indicator of NO regarding its producing mechanism. Its maximum was found at the range of at  $\boldsymbol{\Phi}$ =0.78 to 0.85 for different burner powers. A similar experiment showed that OH<sup>\*</sup>/CH<sup>\*</sup> intensity ratio was independent of burner power as is confirmed by previous researchers. One could infer the equivalence ratio from the flame emission.

#### **Review History:**

Received: 2019-04-18 Revised: 2019-09-20 Accepted: 2019-09-22 Available Online: 2019-10-10

Keywords: Species

Chemiluminescence

Flat flame burner

### **1. INTRODUCTION**

The analysis of spontaneous light emitted by flames is the basis of many diagnostic techniques, designed to determine a wide range of combustion variables, in some cases with excellent spatial or temporal resolutions [1]. Experimental methods used to detect combustion species include intrusive and non-intrusive techniques. Intrusive approaches for combustion diagnostics are typically based on techniques where a mechanical probe is inserted directly into a region of interest. The most undesirable property of intrusive probes - that is, a local interaction with the combustion gases to be analyzed - remains unavoidable [2]. This interaction induces inadvertent reactions and disturbance on the flame shape. The spectroscopy of flames is the most common approach among the non-intrusive techniques. The advent of modern spectrometers, with built-in Charge-Coupled Device (CCD) detectors during recent decades, has encouraged researchers to apply this technology to monitor the combustion performance of bench-scale and laboratory flames [3].

Non-intrusive measurements include passive (nonlaser based) and active (laser-based) methods. Despite their advantages in precise measurements, active methods need complicated apparatus (including lasers, high-speed cameras, lenses, filters, and signal amplifiers). In contrast, Flame Emission Spectroscopy (FES) is a passive approach based on acquiring radiation from a burner flame over a wide spectral region and is characterized by its low cost and robustness against the environmental disturbances [4].

#### 2. EXPERIMENTAL SETUP

A schematic diagram of the experimental apparatus is shown in Fig. 1. Two distinct gas lines, including natural gas (16 mbar-g) and airlines are provided in order to prepare aimed stoichiometric ratios. The composition of natural gas is given in Table 1. The air is supplied by a 0.75 kW side channel blower with an output pressure of 40 mbar-g. A venturitype mixer is implemented to control the mixing process that conducts the air-gas mixture to a multi-hole cylindrical burner with the maximum thermal power of 26kW.

The spectrometer is connected to a computer to collect the intensity-wavelength diagram of each test. In order to reduce background noise, a black graphite plate is installed behind the burner, all tests are carried out in the night, and background emission is subtracted in spectrometer software while conducting each test.

#### **3. RESULTS AND DISCUSSION**

The obtained spectrum, in each case, consists of chemiluminescent species which are detected form their corresponding wavelengths and thermal radiation of the burner surface. In order to distinguish these two emission sources, burner emission was recorded in a time interval in which the burner is suddenly turned off. As a result, surface thermal radiation was found to be mostly in the IR region far from chemiluminescence peaks.

The peak values presented in this figure are related to chemiluminescent species OH\*, CH\*,  $C_2^*$  emitting at wavelengths 310, 431, 516 and 471 nm respectively (the

\*Corresponding author's email: zabetian@modares.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 1. CO,\* intensity ratio variation with  $\Phi$ 



Fig. 2. OH\*/CH\* intensity ratio variation with  ${\pmb \Phi}$ 



Fig. 3. OH\*/CH\* intensity ratio variation with  $\boldsymbol{\Phi}$ 

last two wavelengths are for  $C_2^*$ ). There is a background emission for  $CO_2^*$  in the wavelength band of 350-600 nm (integrated over this range,  $CO_2^*$  emission accounts for its chemiluminescence) [5].

The OH\* is one of the main species which plays an essential role in combustion processes. Figure 5 shows the time-averaged variation of OH\* emission intensity versus equivalence ratio which shows a maximum in the lean burning region of  $\Phi$ =0.77 to 0.85 (for all fuel flow rates). Furthermore, increasing the fuel flow rate enhances the OH\*

intensity peak, meaning an increase in heat release rate (a similar result was reported by Higgins et al. for their coarse grid burner). As the fuel flow rate increases from 1.13 m<sup>3</sup>/h to 1.65 m<sup>3</sup>/h (46% rise) OH\* intensity soars to 1.45 of its initial value at  $\varphi$ =0.8.

Chemiluminescence of  $CO_2^*$  is analyzed showing the heat release rate trend (as illustrated in Fig. 1). The peak intensity for different fuel flow rates is in the range of  $0.78 < \Phi < 0.85$  showing a promising similarity with that of OH\*. Comparing Fig. 3 and Fig. 1 and considering OH\* and  $CO_2^*$  as an indicator of heat release rate (according to [5]), the equivalence ratio range of  $0.78 < \Phi < 0.85$  is reported as maximum heat release rate region and therefore, optimal thermal performance range.

Fig. 2 shows the variation of the intensity ratio of OH\*/ CH\* versus equivalence ratio for different fuel flow rates. The intensity ratio can be used as a tool to evaluate the thermal burner equivalence ratio from its emission. Similar attempts have been made in another application confirming the monotonic trend for OH\*/CH\*. Present results indicate that OH\*/CH\* is almost independent (up to 17% relative difference) of burner power and could be regarded as an index by which one could get to equivalence ratio through OH\*/ CH\*.

The OH\* is one of the main species which plays an essential role in combustion processes. Fig. 3 shows the time-averaged variation of OH\* emission intensity versus equivalence ratio which shows a maximum in the lean burning region of  $\Phi$ =0.77 to 0.85 (for all fuel flow rates). Furthermore, increasing the fuel flow rate enhances the OH\* intensity peak, meaning an increase in heat release rate (a similar result was reported by Higgins et al. for their coarse grid burner). As the fuel flow rate increases from 1.13 m<sup>3</sup>/h to 1.65 m<sup>3</sup>/h (46% rise) OH\* intensity soars to 1.45 of its initial value at  $\varphi$ =0.8.

#### **4. CONCLUSIONS**

An experimental study is conducted to investigate the optimum equivalence ratio range in maximum heat release rate and energy transfer for a multi-hole cylindrical burner using a flame emission spectroscopy approach, which is an optical, non-intrusive technique. The burner which is widely used in condensing gas boilers is investigated by OH\* and  $CO_2^*$  chemiluminescence intensity at different fuel flow rates and equivalence ratios. The two species emissions had a similar peak range of  $\Phi$ =0.78-0.85 that corresponded to the burner maximum heat release rate. The OH\*/CH\* intensity ratio showed a power-independent variation versus  $\Phi$ . Using the proposed correlation, one could obtain  $\Phi$  from burner spectral emission. In targeted fuel flow rates, burner surface temperature showed a peak at  $\Phi$ =0.82 that was in accordance with the equivalence ratio at the maximum heat release rate.

#### REFERENCES

- J. Ballester, T. García-Armingol, Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames, Progress in Energy and Combustion Science, 36(4) (2010) 375-411.
- [2] M. Orain, Y. Hardalupas, Effect of fuel type on equivalence ratio

measurements using chemiluminescence in premixed flames, Comptes Rendus Mecanique, 338(5) (2010) 241-254.

- [3] T. Parameswaran, R. Hughes, P. Gogolek, P. Hughes, Gasification temperature measurement with flame emission spectroscopy, Fuel, 134 (2014) 579-587.
- [4] 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, Proceedings of the Combustion institute, 28(2) (2000) 1757-1764.

[5] J.-M. Samaniego, F. Egolfopoulos, C. Bowman, CO2\* chemiluminescence in premixed flames, Combustion Science and Technology, 109(1-6) (1995) 183-203.

## HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Soltanian, M. Zabetian Targhi, H. Pasdarshahri, Experimental Investigation of Combustion Species Radiation to Evaluate Equivalence Ratio in a Surface Flame Burner, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1) (2021) 15-18.

**DOI:** 10.22060/mej.2019.16162.6290



This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر



نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر، دوره ۵۳ شماره ۱، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۱ تا ۵۲ DOI: 10.22060/mej.2019.16162.6290

# بررسی تجربی تابش گونههای احتراقی در تعیین نسبت همارزی در مشعل شعله سطحی

حسین سلطانیان، محمد ضابطیان طرقی\*، هادی پاسدارشهری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاريخچه داوري: خلاصه: در پژوهش حاضر گونههای مهم احتراقی با سنجش تابش مشعل سوراخدار بررسی شده است. تابش بکمک دریافت: ۲۹–۱۳۹۸-۱۳۹۸ طیف سنجی فیبر نوری روی یک بستر آزمون دارای مشعل با فناوری جدید مورد استفاده در دیگهای چگالشی، بازنگری: ۲۹–۰۶–۱۳۹۸ تحليل شده است. از نورتابی شيميايی برای سنجش گونههای احتراقی \*CH\*،OH ، \* ، C, \* ، CO و K, OH و H<sub>v</sub>O استفاده شده است. به ازای نسبتهای مختلف همارزی و در توانهای ۱۱-۱۶ کیلووات از مشعل، شدت تابش گونهی \* CO<sub>v</sub> که نقش مهمی در تعیین نرخ حرارت آزاد شده از شعله دارد، اندازه گیری شد که شدت بیشینه در محدوده که در OH\* ادر تمامی مقادیر توان مشعل به دست آمد. همچنین بیشترین شدت تابش رادیکال  $OH^*$  که در  $0/VA < \Phi < 0/A$ مراجع بیان گر دومین شاخص تعیین کنندهی نرخ حرارت آزاد شده از مشعل است، در محدوده ۰/۸۵</ توانهای کاری مشعل میباشد که در تطابق بسیار خوبی با محدودهی بیشینهی \*  $\mathrm{CO}_{\mathrm{v}}$  است. همچنین بیشترین محدوده دمای شعله در محدودهی ۰/۸۷×=Q<+/۰ با استفاده از ترموکوپل اندازه گیری شد که با نتایج گونههای \*OH  $m CO_{7}^{*}$  و  $m CO_{7}^{*}$  در ارزیابی بیشترین نرخ حرارت آزاد شده از شعله تطابق مناسبی دارد. بعلاوه، نسبت شدت به صورت مستقل از توان مشعل به دست آمد که توسط سایر محققین نیز تأیید شده است. بنابراین میتوان با سنجش تابش شعله، به نسبت همارزی آن پی برد.

پذیرش: ۳۱–۰۶–۱۳۹۸ ارائه آنلاین: ۱۸-۰۷-۱۳۹۸ كلمات كليدى: طيفتابشى گونههای احتراقی

نورتابي شيميايي آلاينده مشعل شعله سطحي

در آنها حسگر اندازه گیری، به طور مستقیم در منطقهی اندازه گیری

مورد نظر قرار می گیرد. بارزترین ویژگی نامطلوب حسگرهای

اندازه گیری تداخلی که تعامل ناخواسته با سیستم اندازه گیری در

محل اندازه گیری است، غیر قابل اجتناب می باشد [۲]. 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 [۳]. طیفسنجی تابش شعله<sup>۲</sup>، اساس بسیاری از روشهای

غیر تداخلی 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 [۴].

#### ۱–مقدمه

بررسی تابش صادر شده از شعله که به صورت طبیعی و یا حاصل از تحریک آن به کمک یک منبع انرژی خارجی (لیزر) انجام می شود و همچنین نور جذب شده به وسیله شعله، پایهی بسیاری از روشهای اندازه گیری دما و غلظت گونهها در علم احتراق است که در تعیین دامنهی وسیعی از پارامترهای عملکردی سامانههای احتراقی، با حد تفکیک مناسب قابل انجام است [۱]. به همین جهت، روشهای تجربی گوناگونی برای شناسایی و تشخیص گونهها، از جمله روشهای تداخلی ٔ و غیر تداخلی ٔ مورد استفاده قرار می گیرد. در اندازه گیری های احتراق، روشهای تداخلی به گروهی از روشها اطلاق میشود که

Intrusive methods

Non-intrusive methods

<sup>\*</sup> نویسنده عهدهدار مکاتبات: zabetian@modares.ac.ir

Flame emission spectroscopy

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیر کبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) 🖌 در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



شکل ۱. صادر کردن نور در اثر پدیدهی نورتابی شیمیایی Fig. 1. Emission from chemiluminescence

مشخصههایی که عملکرد مشعل با استفاده از آنها مورد ارزیابی قرار می گیرد، 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 منطبق با طراحی در تنظیم نسبت هوا و سوخت، بالا بودن سهم تشعشع نسبت به جابجایی در انتقال گرمای کلی و پایداری کلی از نظر وجود احتراق در سراسر مشعل بدون برخاستگی<sup>۱</sup> شعله و پسزنی<sup>۲</sup> آن است [۵]. در مقالهی اخیر، تمرکز روی بررسی میزان حضور گونههای مهم احتراقی و بررسی نسبت سوخت به هوا با هدف دستیابی به نسبت همارزی مناسب جهت بهینه بودن نرخ حرارت آزاد شده از احتراق است.

اندازه گیری های غیر تداخلی، شامل روش های غیر فعال<sup>۳</sup> (غیر لیزری) و فعال<sup>۴</sup> (لیزری) است. در این دسته بندی، روش های لیزری با وجود قابلیت اندازه گیری دقیق و کاملاً هدفمند، نیازمند تجهیزات گران قیمت (مانند لیزر، دوربین های با سرعت بالا، عدسی ها، فیلتر ها و نظایر آن) بوده و پیچیدگی اجزاء زیادی دارند. طیف سنجی تابشی شعله<sup>6</sup>یک روش غیر فعال حساس به اغتشاشات خارجی است که براساس دریافت تابش از شعله، در یک منطقه طیف گسترده از آن عمل می کند. از جمله مزیت های این روش، کم هزینه بودن، سادگی کاربرد و مقاومت در برابر اغتشاشات محیطی (بر خلاف روش لیزری

روش طیفسنجی تابشی شعله که بر اساس مشخصات نوری فرآیند احتراق است، شامل دو نوع تحلیلِ نورتابی شیمیایی و تحلیل

تابش حرارتی (که عمدتاً در محدوده مادون قرمز اتفاق می افتد) میباشد. این روش به عنوان جایگزینی مناسب در اندازه گیریهای مربوط به احتراق نسبت به روشهای پیشین، شناخته میشود و به علت سادگی پیادهسازی بستر آزمون و ماهیت نوری غیر فعال آن (که مزیت عدم ایجاد اثرات جانبی بر شعله توسط انرژی جذب شده از احتراق را دارد)، در مقایسه با اندازه گیری به کمک لیزر، برای کاربردهای تجربی مناسب است [۴]. در دو دههی اخیر، دسترسی به طیف سنجهای فیبر نوری قابل حمل<sup>3</sup>، 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 که مستقیماً منجر به تولید گونههای برانگیختهی نورتاب میشوند، میباشد. طول موج تابش این گونههای نورتاب وابسته به نوع گونهی برانگیختهی تولید شده از واکنش و همچنین تغییر تراز الکترونی آن در رسیدن به حالت پایدار است که منجر به تابش طول موج مشخصی از آن گونه شده و آن گونه را از سایرین متمایز میسازد. نور تابیده شده به طور مستقیم هم جهت با تغییرات غلظت رادیکالهای برانگیخته است که یکی از نتایج نرخ تشکیل و نابودی آنهاست [۷]. شکل ۱ طرحی از نور تابید شده در اثر بازگشت گونهی نورتاب از حالت بر انگیخته به حالت پایدار را نشان میدهد.

در بخش تشخیص گونهها، بانک دادههای طیفی مربوط به طیفهای تابشی گونهها موجود است که با استفاده از آنها، تشخیص گونهها انجام میشود. به طور کلی طیفهای تابشی، به دو شکل طیف تابش گرمایی (ناشی از تشعشع برانگیختگی<sup>۷</sup> به علت دمای

<sup>1</sup> Lift off

Flash back
 Passive

<sup>4</sup> Active

<sup>5</sup> Flame Emission Spectroscopy (FES)

<sup>6</sup> Portable fiber optic spectrometer

<sup>7</sup> Excitement

بالای گونهها) و طیف تابشی نورتابی شیمیایی<sup>۱</sup> گونهها<sup>۲</sup> (ناشی از برانگیختگی گونهها به علت شرکت آنها در واکنشهای شیمیایی) تقسیم میشوند. در این مقاله طیف ناشی از نورتابی شیمیایی مد نظر است.

گونهی \*  ${}_{\gamma}OO$  برخلاف سایر گونههای احتراقی نورتاب (OH\*،  $\mathcal{C}_{\gamma}$  \*  ${}_{\gamma}O$  و  $\mathcal{C}_{\gamma}H$ )، دارای طول موج متناظر با بیشینهی نمودار طیف حاصله نبوده و محدودهای از طول موجها بین ۳۵۰ تا  $\mathcal{F}^{\circ}$  نانومتر را در بر می گیرد. تابش این گونه به صورت پس زمینهای در طیف به دست آمده است که سایر بیشینههای نمودار روی آن قرار می گیرند. برای به دست آوردن میزان تابش آن باید از نمودار شدت-طول موج در بازهی مذکور انتگرال گرفته شود و این مقدار متناظر با شدت آن خواهد بود. همچنین دو گونهی \* $O_{\gamma}H$  و \*  $_{\gamma}OO$  دارای بخش مهمی از طول موج در منطقهی مادون قرمز میباشند که هر یک از آنها نیز میتواند مورد تحلیل قرار گیرد اما در بخش ۲۰۰ تا یک از آنها نیز میتواند مورد تحلیل قرار گیرد اما در بخش ۲۰۰ تا به دست میدهد که در بخش مرور ادبیات نیز به آن اشاره شده است.

از اوایل دههی ۹۰ میلادی پژوهشها با استفاده از تحلیل طیف تابشی احتراق در حال پیگیری است. رائو و همکاران با پیگیری ردپای NO در تابش طبیعی احتراقی در شعلههای پروپان و اتیلن ارتباط لگاریتمی بین مقدار NO و و تابش مجموع \*OH و \*CH به دست آوردند، همچنین هرناندز و همکاران تابش رادیکالهای مذکور را با پایداری شعله بررسی کردند [۸ و ۹]. سامانیگو و همکاران [۱۰] در سال ۱۹۹۵ به بررسی تابش <sup>\*</sup> CO<sub>r</sub> را در شعلههای آرام و درهم را به شکل عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها بین تابش و غلظت اتمهای H رابطهای به دست آوردند که از تعادل  $\mathrm{CO}_{r}^{*}$ میان گونههای O، CO و H به وجود آمده است و افزایش تابش را نشان دهنده ای از افزایش تزریق سوخت و تولید حرارت  ${
m CO}_{
m v}$ دانستند. در سال ۲۰۰۰، کوجیما و همکاران[۱۱] به بررسی تابش CH\* ،OH\* و \* <sub>v</sub> C<sub>v</sub> در شعله پیش آمیخته ی متان در هوا در نسبتهای همارزی ۰/۹ الی ۱/۵ پرداختند. یافتهی آنها رابطهای ميان شدت تابش \*OH\*/CH، C<sub>x</sub> \*/OH و \*C<sub>y</sub> +/OH با نسبت همارزی، در ناحیه واکنش بود. در سال ۲۰۰۴، هاردالوپاس و اورین[۱۲]تابش گونههای رادیکالی آزاد و طیف پیوسته \* CO<sub>v</sub> در

شعلهی پیش آمیختهی گاز طبیعی با نسبت همارزی 1/7 الی 1/7 را مورد بررسی قرار دادند. در کار صورت گرفته، تابش 0.4،  $CH^{3}$  و تابش پس زمینه \*  $CO_{7}$  به عنوان یک شاخص مناسب جهت بررسی میزان حرارت آزاد شده به دست آمد. طیف تابشی فراوردههای احتراق در محدودهی 0.5 تا 0.7 نانومتر شامل پس زمینهی \*  $CO_{7}$  است که بر روی آن تابش محلی گونههای 0.4 0.4 0.4 و \* 0.7 سوار شدهاند. همچنین آنها به رابطهی مستقیم میان نسبت تابش/0.4

یاناتسوس و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۰ نورتابی شیمیایی گونههای \*CH\*، OH و \* <sub>۲</sub> C در شعلهی پروپان و دیگر سوختها نظیر ایزواکتان، اتانول و متانول را برای نسبتهای مختلف همارزی بررسی کردند. آنها دریافتند که با کاهش نسبت همارزی، نسبت تابش \*OH\*/CH نیز کاهش می یابد. همچنین گونه ک<sup>\*</sup> ۲٫ به عنوان نمایان گر نرخ آزادسازی حرارت در احتراق سوخت پروپان معرفی شد. در سال ۲۰۱۴ پارامسوارام و همکاران [۱۴] با استفاده از طیف تابش شعله، دمای شعله را اندازه گیری کردند. نتایج به دست آمده از محاسبهی دما با استفاده از طیف تابشی، تطابق مناسبی با دمای به دست آمده از ترموکوپل مرجع داشت. همچنین قابلیت اندازه گیری دماهای بالای احتراقی به عنوان یکی از مزایای روش استخراج دما با استفاده از طيف تابشي عنوان شد. دپالو و همكاران [10] در سال ۲۰۱۶ 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. ژائو [۱۶] طیفسنجی را در مشعلهای حاوی جریان بخار و هوا انجام دادند. نتیجهی دیگر این مقاله آن است که گونهی  $C_r$  با افزایش بخار در مشعل کاهش می یابد. نتیجه ی دیگر این مقاله آن است که با افزایش فاصله از سرمشعل، نسبت شدتهای \*OH\*/CH و \* OH/C\* افزایش و \*C<sub>7</sub> \* /CH کاهش مییابد و میتوان تابش گونه یاصلی را مرتبط با نورتابی شیمایی در محدودهی وسیعی از طول  ${\rm CO}_{
m v}^{*}$ موج دانست [۱۰].همچنین رومرو و همکاران به بررسی میزان NO تولیدی و ارتباط آن با تابش \*OH در کوره پرداختند و تغییر همزمان این دو را در نتایج خود عنوان کردند [۱۷].

گونههای احتراقی مهم، نقشی اساسی در واکنشهای زنجیرهای

<sup>1</sup> Chemiluminescence

<sup>2</sup> Species

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۱، سال ۱۴۰۰، صفحه ۴۱ تا ۵۲



Fig. 2. Plan of air and gas lines with measurement and control instruments

احتراق داشته و میتوانند جهت بررسی شاخصهای عملکردی احتراقی مورد استفاده قرار گیرند. بر همین اساس، در این پژوهش با استفاده از طیفسنجی تابش شعله، این گونهها در ابتدا روی مشعل سوراخدار<sup>(</sup> تشخیص داده شده و کارایی آن در تعیین نرخ حرارت آزاد شده از شعله (از روی فراوردهی \* CO<sub>7</sub> و \*OH) و دمای سطح مشعل نشان داده شده است. در ادامه دستگاه آزمون معرفی شده و تجهیزات به کار رفته در آن تشریح می شوند.

## ۲-معرفی بستر آزمون و تجهیزات آزمایشگاهی

یک مشعل سوراخدار که به طور گستردهای در صنایع احتراق (دیگهای چگالشی) استفاده میشود، در این مطالعه استفاده شده است. نصب و راهاندازی شامل موارد زیر است: یک دمندهی<sup>۲</sup> یک طرفه<sup>۲</sup> با قدرت ۲۸/۵ کیلووات و سرعت زاویهای ۲۸۳۰ دور بر دقیقه، یک مشعل با ظرفیتی در محدودهی ۳۰–۱۰ کیلووات و شکل استوانهای با قطر ۷ سانتیمتر و طول ۱۰ سانتی متر، طیفسنج، شیر کنترل دبی، تنظیم کنندهی فشار، روتامتر هوا و دماسنج دو فلزی که دارای دقت یک درجه سلسیوس و محدوده ۶۰–۰ درجه سلسیوس است. فشارسنج دارای دقت یک میلیبار و محدودهی اندازه گیری ۴۰–۰

سوخت و هوا استفاده شده است. شیرهای دروازهای<sup>۵</sup> به کار رفته جهت تنظیم دبی سوخت و هوا مورد استفاده قرار گرفتهاند. مسیرهای دوگانهی هوا و سوخت در شکل ۲ مشخص است که مشخصات دقیق لوله کشی خطوط گاز و هوا را نشان می دهد. مطابق این شکل، گاز طبیعی از یک خط گاز (۱) با فشار نسبی ۹/۶۵ کیلو پاسکال به مخلوط کننده (۴) از طریق یک تنظیم کننده (۲) که فشار را تنظیم می کند، وارد می شود. دبی جریان سوخت قبل از ورود به مخلوط کننده با یک روتامتر (۳) اندازه گیری می شود. جریان هوا توسط دمنده (۵) به مخلوط کننده با تنظیم کننده در مسیر خود و یک روتامتر<sup>9</sup> برای اندازه گیری جریان آن دمیده می شود.

روند کلی انجام آزمون به این صورت است که در ابتدا خط گاز و هوا با فشارهای نسبی به ترتیب ۱۶ و ۴۰ میلی بار راهاندازی شده و با توجه به شکل۲ به مخلوط کننده و پس از آن به سرمشعل می رسند. ابتدا مقدار دبی حجمی سوخت را تنظیم کرده (معرف توان مشعل) و مقدار دبی هوای ورودی تغییر داده می شود. نسبت همارزی از روی دبیهای تنظیم شده و ارزش حرارتی سوخت به دست می آید. فیبر نوری با استفاده از یک نگهدارنده در فاصله ۵۰ سانتی متری مقابل شعله و عمود بر مرکز هندسی سرمشعل، به منظور دریافت تابش آن نصب شده است. زاویه ی واکرایی فیبر معادل ۳۷/۰= $\sin \alpha$  رادیان بوده به طوری که کل تابش مشعل را دریافت می کند. فیبر (با قطر بوده به طوری که کل تابش مشعل را دریافت می کند. فیبر (با قطر

<sup>1</sup> Perforated burner

Blower
 Side-channel blower

<sup>4</sup> Venturi mixer

<sup>5</sup> Gate valve

<sup>6</sup> Rotameter

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۱، سال ۱۴۰۰، صفحه ۴۱ تا ۵۲



شکل ۳. طرحواره قرار گیری فیبر نوری نسبت به سرمشعل Fig. 3. Schematic of optical fiber positioning with burner



Burner

شکل ۴. شماتیک بخش نوری تجهیزات چینش آزمون Fig. 4. Schematic of optical part of test rig

داده شده است.

توان نامی مشعل ۲۶ kW میباشد. در جدول ۱ تجهیزات اندازه گیری به همراه محدوده های آن ها به صورت مختصر ارائه شده است.

شکل ۵ 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 ۲ مشخصات فنی طیفسنج مورد استفاده، ارائه شده است. حسگر آشکارساز مورد استفاده در طیفسنج از مدل TCD۱۳۰۴AP متعلق به شرکت توشیبا<sup>۱</sup> است. از ورود نورهای مزاحم اطراف به کمک صفحهی مشکی نسوز قرار گرفته در پشت مشعل و همچنین کم کردن نویز پس زمینه در طیفسنج جلوگیری شده است. زمان نوردهی روی صورت کلی فاصله و زاویه را نسبت به سرمشعل نمایش میدهد. طیفسنج به یک رایانه مجهز است که نمودار شدت بر حسب طول موج را با یک نرمافزار نصبشده بر روی آن فراهم می کند. از یک ورق نسوز با رنگ سیاه به منظور کم کردن نور پس زمینه و همچنین ورق گالوانیزه پیرامون کل مشعل، جهت جلوگیری از اغتشاش شعله به علت عوامل محیطی مانند باد و همچنین کمینه سازی نورهای محیطی وارد شده به بستر آزمون، استفاده شده است. دادههای حاصل از طیف سنج، به ازای هر آزمایش، ده مرتبه و در لحظههای با فاصلهی مساوی یک ثانیه، ثبت شده و میانگینی از آنها برای هر تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفته است که طی آن تکرار پذیریی آزمایش ها نیز به ازای ده بار داده برداری در فاصله زمانی ۱ ثانیه انجام شده است. در این حالت بیشینه مقدار عدم قطعیت شدت دریافتی ۹٪ بوده است. در

1 Toshiba

Contraction of the local division of the loc		
H.		
"	A 1	-

تجهیزات اندازهگیری	جدول ۱. محدوده و دقت
Table 1.Range and accuracy	y of measurement instruments

محدودهي كارى

۱°C

۱ m<sup>°</sup>/h

۱°C

 $\cdot m^{r}/h/\cdots$ 

۱mbar

تجهيز

دماسنج خط هو ا

دبىسنج هوا

دماسنج خط گاز

دبیسنج گاز

فشار سنج خط هوا و گاز

دقت

1-7. °C

۱-۴۵ m<sup>°</sup>/h

۰-۶۰°C

 $\cdot m^{r}/h/\cdot a$ 

۰-۱۰۰mbar

Thermometer		
	2000	1 5cm
Multi-hole	ի Դիի լախի լախի լախի լախի լախի լախի Հայունություն	140114014014014014
cytindrical burner	նը) լնը) լնը) լնը) լնը) լնը) լնը) լնը) լ	)(0))(0)(0)(0)(0))( )(0)(0)(0)(0)(0)(0)(0)(0)(0)(0)(0)(0)(0)
Mixer	նըի էրիի էրիի էրիի էրիի էրիի էրիի էրիի նրի էրիի էրիի էրիի էրիի էրիի էրիի էրիի	լնիչելնիշնիչենիչենիչ լնիչենիշնիչենիչենիչել 

شکل ۵. دستگاه آزمون طراحی و ساخته شده، مربوط به مشعل سوراخدار پیش آمیخته Fig. 5. The designed and fabricated setup pertaining to premixed perforated burner

اندازه/ محدوده	ویژگی
۲••-۱۱••nm	محدودهی طول موج
۱/Anm	تفكيكپذيرى
3784	تعداد پيكسل
٨٠٠:١	نسبت سیگنال به نویز
۱ • μs – ۶ • s	محدودهی زمان پرتوگیری

جدول ۲. محدوده و دقت اندازه گیری طیف سنج Table 2. Range and accuracy of spectrometer

آمدهاند. مقادیر محاسبه شدهی نسبتهای همارزی برای گاز طبیعی، با درصد گازهای ۸۷/۷٪ متان، ۴/۷٪ اتان، ۱/۷۴٪ پرویان و ۵/۸۶٪ ترکیب سایر گازها، انجام شده است. این درصد گازها و شرایط محیطی مربوط به ماه پایانی تابستان است. همچنین کلیهی نتایج با سه بار تکرار

۱۰ms تنظیم شده و برای افزایش نسبت سیگنال به نویز انجام شده است. در نرمافزار طیفسنج از میانگین گیری جهت به دست آوردن طیفهای به دست آمده حاصل شده است. دادههای آزمایشها در دمای محیط ۲۵ درجهی سلسیوس و فشار محیط ۸۸/۵ کیلویاسکال به دست



شکل ۶. انتقال حرارت از قسمت حسگر ترموکوپل، جهت محاسبهی تصحیح خطای دمای آزمایش Fig. 6. Heat transfer from thermocouple bead to assess measured temperature error

آزمون در هر مورد به دست آمده است که میانگین نتایج آورده شده است. به منظور اطمینان از محدودهی مناسب نرخ حرارت آزاد شده از مشعل، دمای مشعل را با استفاده از ترموکوپل نوع S اندازه گیری شده و در بخش نتایج آورده شده است. با توجه به این که در دماهای احتراقی، دمای گزارش شده از ترموکوپل نیازمند تصحیح است (تصحیح ترموکوپل به واسطهی تابش سطح کروی حسگر ترموکوپل به محیط اطراف)، در ادامه روش تصحیح که در حصول نتایج دما لحاظ شده است، آورده شده است.

## ۳-تصحیح دمای ترموکوپل

دمای ترموکوپل که در داخل گازهای احتراقی شعله خوانده میشود، نشان دهندهی دمای واقعی شعله نبوده و باید تصحیحاتی روی آن انجام شود. علت این امر آن است که ترموکوپل دمای گوی انتهایی خود (محل برخورد دو سیم با جنسهای مختلف) را نشان میدهد و این در حالی است که مقداری از این دما به واسطهی اختلاف دمای آن بخش با محیط اطراف از طریق تابش و یا جابجایی و حتی هدایت حرارت از دست رفته یا به دست میآید. با توجه به روابط (۱) تا (۳) و با در نظر گرفتن این نکته که دمای شعله بالا بوده و تشعشع سهم زیادی را ایفا می کند، از این بخش از حرارت که بسته به دمای اطراف از دست رفته یا به دست میآید، نباید صرف نظر به دمای اطراف از دست رفته یا به دست میآید، ناید صرف نظر بهم عمدهای نداشته و نسبتاً قابل اغماض میباشند. انتقال حرارت مهم عمدهای نداشته و نسبتاً قابل اغماض میباشند. انتقال حرارت

مختلف انتقال حرارت در سرِ ترموکوپل را نشان میدهد که در آن هر سه حالت انتقال حرارت تابشی، هدایت و جابجایی در نظر گرفته شده است.

رابطهی (۱) که مربوط به بقای انرژی برای سامانهی در نظر گرفته شده از سر ترموکوپل میباشد را در نظر گرفته و از روی آن دمای تصحیح شدهی گازهای احتراقی در تماس با ترموکوپل مطابق رابطهی (۳) به دست خواهد آمد.

$$Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{cond} = 0 \tag{1}$$

$$h(T_g - T_b) + \varepsilon \sigma (T_b^4 - T_w^4) + (\frac{kA}{LA_{sur}}) \Delta T = 0$$
 (Y)

$$T_{g} = T_{b} + \frac{\varepsilon\sigma(T_{b}^{4} - T_{w}^{4}) + (\frac{kA}{LA_{sur}})\Delta T}{h} \cong T_{b} + \frac{\varepsilon\sigma(T_{b}^{4} - T_{w}^{4})}{h}$$
(<sup>r</sup>)

که در آن  $T_g, T_b, T_w, A, L, K_b, T_w, T_b, T_g$ و Q به ترتیب دمای گازهای احتراقی، دمای سر ترموکوپل، دمای دیوارهی مجاور به مشعل، ضریب رسانش سیم ترموکوپل، مساحت مقطع ترموکوپل، ضریب صدور سر ترموکوپل و گرمای منتقل شده میباشند.

## ۴-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 نسبت



شکل ۷. نمودار طیف تابشی شعلهی پیش آمیختهی مشعل سوراخدار که شدت نور تابشی شعله را بر حسب طول موج در نسبت همارزی  $\Phi = 1/00$  و ظرفیت مکل ۷. نمودار طیف تابشی شعله ی منعل  $\Phi = 1/00$  و ظرفیت P = 11/06 kW مشعل

Fig. 7. Emission spectrum of perforated burner in equivalence ratio of Φ=1.00 and power of P=11.74 kW

شدت \*OH\*/CH آورده شده است. در شکل ۷ طیف تابشی مربوط به مشعل سوراخدار که در حالت پیش آمیخته بوده برای نسبت همارزی یک (دبی گاز ۱/۱۳ m<sup>۲</sup>/hr و دبی هوای ۱۰/۵۳ m<sup>۲</sup>/hr ا )، ارائه شده است. بیشینههای نمودار مربوط به گونههای اصلی نورتاب شیمیایی در شعله میباشد که شامل \*OH، \*H ، \*  $C_{\gamma}$  ۲ نورتاب شیمیایی در شعله میباشد که شامل \*OH، \*OH ، \* یا نورتاب است. تابش این گونهها همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است در طول موجهای ۳۱۱ ، ۳۱۱ ، ۵۱۶ و ۴۷۱ نانومتر رخ داده است (دو مورد انتهایی مربوط به  $r_{\gamma}$  است) [۷]. همچنین طول موج ۹۳۳ نانومتر مربوط به گونهی اصلی احتراقی \*O<sub>۲</sub> که فراوردهی اصلی احتراق نیز تلقی میشود، میباشد [۸].

در شکل ۸ تغییرات شدت تابش گونهی \*OH بر حسب نسبت همارزی در توانهای مختلف مشعل رسم شده است. این محدوده از توان با توجه به منطقهی پایداری شعله و با در نظر گرفتن محدودههای کاری روتامترهای خط سوخت و هوا تعیین شده است. در این شکل در منطقهای که شعله تابندهتر است، حرارت آزاد شده بیشتر بوده و شدت تابش \*OH نیز بیشتر است. بدین ترتیب، بالاتر بودن تولید رادیکال میانی \*OH مرتبط با احتراق کامل تر و با آزادسازی حرارت بیشتر است. گونهی هیدروکسیل (\*OH) در تعیین نرخ حرارت آزاد شده نقش کلیدی دارد چرا که زنجیرهی واکنشهای دما بالا را فعال میکند [۵] و به همین دلیل، در این بخش تحلیل شده است. همچنین

تولید زیاد این گونه تعیین کننده ی آن است که شعله حاصل شده پایدارتر خواهد بود [۱۹]. همان طور که در شکل ۸ ملاحظه می شود، با افزایش نسبت همارزی، شدت گونه ی\*OH در مقادیر نسبتاً رقیق سوز (برای تمامی ظرفیت های مشعل)، بیشینه است که در محدوده ی نسبت همارزی ۸۵/۰-۷۷/۰ قرار می گیرد. همچنین با افزایش ظرفیت مشعل، مقدار تابش \*OH برای تمامی حالات، روند افزایشی را نشان می دهد که میزان ۴۵٪ افزایش از کمترین تا بیشترین ظرفیت (در نسبت هم ارزی ۸/۰) می باشد و این امر حاکی از بالاتر بودن نرخ حرارت آزاد شده از شعله است که به واسطه ی افزایش مقدار سوخت، حاصل می شود. بالا بودن شدت گونه ی\*OH، بهبود تداوم و ثبات فرآیند احتراق را به دنبال خواهد داشت. حد پایین نسبت هم ارزی (حد ارت آن می گیرد.

شکل ۹ تغییرات شدت گونهی فراورده \* CO<sub>7</sub> را نشان میدهد. بیشیه مقدار تولید این گونه معرف کامل تر بودن فرایند احتراق بوده و همان طور که در مرور ادبیات عنوان شد این بیشینه، بیان گر حداکثر نرخ حرارت آزاد شده از مشعل نیز میباشد که به واسطهی بالاتر رفتن دمای شعله صورت پذیرفته است. بدین ترتیب بالاترین نرخ حرارت آزاد شده در احتراق صورت گرفته در مشعل، در محدودهی مراحه می واقع شده است. مشخصاً می توان این محدوده را مشابه محدودهی نسبت هم ارزی

<sup>1</sup> Chemiluminescent



شکل ۸. تغییرات شدت تابش مربوط به گونه OH\* بر حسب نسبتهای مختلف همارزی و در ظرفیتهای مختلف مشعل در کنار شکل واقعی شعله در چند نسبت همارزی(نسبت سوخت به هوا)

Fig. 8. OH\* intensity variation for different burner powers versus equivalence ratio



شکل ۹. تغییرات شدت تابش مربوط به گونه  $*_{CO_{\gamma}}$  بر حسب نسبتهای مختلف همارزی و در ظرفیتهای مختلف مشعل Fig. 9.CO<sub> $\gamma$ </sub>\* intensity variation for different burner powers versus equivalence ratio

مربوط به بیشینهی تابشِ \*OH دید. آخرین نتیجه در قسمت تشخیص گونهها، مربوط به نسبت شدت آمده است. همان طور که در شکل ۱۰ دیده می شود برای توان های



شکل ۱۰. نمودار تغییرات نسبت شدت OH\*/CH\* بر حسب نسبت همارزی در توانهای مختلف مشعل Fig. 10. intensity ratio of OH\*/CH\* as a function of equivalence ratio



شکل ۱۱. تغییرات دمای اصلاح شدهی شعله بر حسب نسبتهای مختلف همارزی و در ظرفیتهای مختلف مشعل Fig. 11. Variation of flame corrected temperature versus different equivalent ratios in some powers

مختلف مشعل سوراخدار روند کلی نمودار ثابت بوده و حداکثر خطای نسبی به دست آمده ۱۷٪ است. به این ترتیب می توان نسبت همارزی مشعل را تنها به کمک دریافت تابش طبیعی شعلهی آن به دست آورده و جهت تنظیم آن اقدام کرد.

در کارهای مشابه دیگر نیز روند غیر وابستهی نسبت شدت گونهها، به دبی مخلوط ورودی به مشعل (توان مشعل) در کاربردهای دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است که مشابه آن را در مرجع [۱۲] میتوان یافت. ارتباط یک به یک نسبت \*OH\*/CH با نسبت همارزی به ویژه در محدودهی ۸۵/۰>Φ<۰/۸۵ در مورد این مشعل این امکان را فراهم می کند که بتوان از فاصلهی نیم متری نسبت همارزی آن را نیز اندازه گرفت.

کلیهی دادههای به دست آمده برای شدت تابش، با عدم قطعیت ۱۰٪ مقدار گزارش شده و دمای سطح سرمشعل دارای عدم قطعیت ۱۵<sup>o</sup>C است. همچنین کلیهی دادهها با سه بار تکرار آزمایش در شرایط یکسان به عنوان تکرار پذیری آزمایش انجام شده است. تحلیل عدم قطعیت دادههای آزمایشگاهی به این صورت است که در هر آزمایش شدت طیف حاصله با فرکانس۲۰ Hz ثبت شده و از دادههای حاصله انحراف معیار مطابق رابطهی (۱) به دست آمده است (که معادل عدم قطعیت در هر آزمایش است).

$$w = \sqrt{\frac{\sum \left(I - \overline{I}\right)^2}{n}} \tag{1}$$

که در آن w عدم قطعیت در تابش بوده و I شدت به دست آمده از آزمایش و n تعداد دادههای برداشت شده در هر آزمایش است.

شکل ۱۱ تغییرات دمای مشعل را برای توانهای کاری و بر حسب نسبت همارزی نشان میدهد.

ملاحظه می شود که بیشینه دمای اندازه گیری شده از ترمو کوپل نوع S (۰/۸۷ ح/۵ -۷/۷۷) به شکل مناسبی تأیید کنندهی محدودهی بیشینه تابش در شکلهای ۸ و ۹ (گونههای \*OH و \* CO<sub>۲</sub>) مربوط به مربوط به بیشینه نرخ حرارت آزاد شده از مشعل است که به به وسیلهی دمای اندازه گیری شده نیز تأیید شده است.

## ۵-نتیجهگیری و جمعبندی

در این مقاله، طیف تابش طبیعی شعله در سرمشعل سوراخدار به عنوان ابزاری برای تشخیص و اندازه گیری شعله به کار گرفته شد، به نحوی که روش به کار گرفته شده در خصوص ارزیابی عملکرد مشعل در نرخ حرارت آزاد شده کارایی ویژهای داشته و میتوان از روی نتیجهی اخذ شده، محدودهی مناسبِ نسبت همارزی را تعیین نمود. بر این اساس گونههای نورتاب مهم احتراقی در دستگاه مشعل سوراخدار با احتراق پیش آمیخته، شناسایی شده و تابش آنها مورد تحلیل قرار گرفت. تغییرات شدت تابش گونهی \*OH و \* <sup>7</sup> CO در سرمشعل سوراخدار برای نسبتهای مختلف همارزی و ظرفیتهای مختلف مشعل، به دست آمد که به عنوان شاخصی از نرخ حرارت آزاد شده مورد ارزیابی قرار گرفت. مهمترین دستاوردهای این مقاله به شرح زیر است:

• نسبت همارزی بهینه برای تنظیم بیشترین نرخ حرارت آزاد  $\operatorname{CO}_{\tau}^{*}$  و  $\operatorname{OH}^{*}_{\tau}$  شده از مشعل که مربوط به بالاترین میزان تابش $\operatorname{OH}^{*}_{\tau}$  و  $\operatorname{OH}^{*}_{\tau}$  است، در محدودهی مشترک  $\Phi^{<1/4}$  اتفاق افتاد.

• تغییرات نسبت شدت تابش \*OH\*/CH مشخص کنندهی رابطهای مستقل از توان مشعل بوده و از روی آن میتوان به نسبت همارزی مشعل پی برد. بدین ترتیب میتوان مشعل را جهت بهبود مصرف سوخت تنظیم کرده بدون این که به آن نزدیک شویم.

 دمای شعله، اندازه گیری شده و پس از تصحیح مربوط به خطای ترموکوپل، بیشترین منطقهی دمایی در محدودهی ۰/۸۷ ح/۰/۸۷
 به دست آمد که در تطابق خوبی با نتایج مربوط به بیشینه حرارت آزاد شده مربوط به تابش گونههای \*OHو \* CO قرار دارد.

• در کاربردهای صنعتی، استفاده از این روش در تعیین نسبت همارزی برای مشعلهای کاربردی در صنایع مختلف در توانهای کاری متفاوت آنها و همچنین کاربرد این روش در تعیین محدودهی عملکرد حرارتی مناسب مشعلهای صنعتی، مورد توجه است.

کار حاضر ابزاری را به منظور بررسی غیرتماسی ویژگیهای عملکردی مشعلهای مورد استفاده در دیگهای چگالشی مورد توجه قرار داده است در عین حال روش به کار گرفته شده قابل توسعه به سایر سامانههای احتراق صنعتی بوده و تعیین محدودهی عملکرد حرارتی مناسب مشعلهای صنعتی با آن به سادگی امکانپذیر است.

## مراجع

- J. Ballester and T. Garcia, Diagnostic Techniques for The Monitoring and Control of Practical Flames, Progress in Energy and Combustion Science, 36(2)(2010) 375–411.
- [2] A. Leipertz, S. Pfadler and R. Schießl , An Overview of Combustion Diagnostics Handbook of Combustion, New York: McGraw-Hill, (2010).
- [3] E. C. Rada, Thermochemical Waste Treatment by Combustion Gasafication and Other Methodologies, New Jersey: Apple Academic Press, (2017).
- [4] C. E. Baukal, Industrial Combustion Testing, London: Taylor & Francis, (2010).
- [5] S. R. Turns and S. J. Mantel, An Introduction to Combustion, Second Edition, New York, McGraw Hill, (2000).
- [6] A. Labergue, J. D. Penacarillo, M. Gradeck and 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, International Journal of Heat Mass Transfer, 104(2)(2017) 1008–1021.
- [7] J. Ballester and T. Garcia-Armingol, Diagnostic Techniques for The Monitoring and Control of Practical Flames, Progress in Energy and Combustion Science, 36(4)(2010)375–411.
- [8] M. Ruão, M. Costa, and M. G. Carvalho, NOx Diagnostic System Based on a Spectral Ultraviolet/Visible Imaging Device, Fuel, 78 (1999) 1283–1292.

- [14] T. Parameswaran, R. Hughes, P. Gogolek, and P. Hughes, Gasification Temperature Measurement With Flame Emission Spectroscopy, Fuel, 134(3)(2014)579–587.
- [15] J. M. de Paulo, J. E. M. Barros and P. J. S. Barbeira, A PLS Regression Model Using Flame Spectroscopy Emission for Determination of Octane Numbers in Gasoline, Fuel, 176(1)(2016) 216–221.
- [16] J. Li, J. Zhao, S. Guo, X. Zhou, Y. Lio, J. Bai and Y. Fang, Predicting the Vanadium Speciation During Petroleum Coke Gasification by Thermodynamic Equilibrium Calculation, Fuel, 176 (2016) 48–55.
- [17] C. Romero, X. Li, S. Keyvan, and R. Rossow, Spectrometerbased Combustion Monitoring for Flame Stoichiometry and Temperature Control, Applied Thermal Engineering, 25(2)(2005) 659–676.
- [18] A. G. Gaydon, The Spectroscopy of Flames, Amsterdam: Springer, (1974)
- [19] 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, 51(4)(2008) 133-138.

- [9] J. J. Hernández, M. Lapuerta, and J. Barba, Flame Stability and OH and CH Radical Emissions From Mixtures of Natural Gas With Biomass Gasification Gas, Applied Thermal Engineering, 55(4)(2013)133–139.
- [10] J. M. Samaniego, F. N. Egolfopoluos and C. T. Bowman, CO2
   \* Chemiluminescence in Premixed Flames, Combustion Science and Technology, 109(3)(1995)183–203.
- [11] J. Kojima, Y. Ikeda and T. Nakajima, Spatially Resolved Measurement of OH\*, CH \*, and C2\* Chemiluminescence in The Reaction Zone of Laminar Methane-Air Premixed Flames, Journal of Combustion Institute, 28 (2000)1757– 1764.
- [12] Y. Hardalupas and M. Orain, Local Measurements of the Time-dependent Heat Release Rate and Equivalence Ratio Using Chemiluminescent Emission From a Flame, Combustion and Flame, 139(2004) 188–207.
- [13] C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas and A. Taylor, Numerical Evaluation of Equivalence Ratio Measurement Using OH\* and CH\* Chemiluminescence in Premixed and non-Premixed Methane-air Flames, Combustion and Flame, 156 (2009)273–291.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم H. Soltanian, M. Zabetian Targhi, H. Pasdarshahri, Experimental Investigation of Combustion Species Radiation to Evaluate Equivalence Ratio in a Surface Flame Burner, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1) (2021) 41-52.

DOI: 10.22060/mej.2019.16162.6290

