

پایاده سازی روش و شناسایی تجربی تابش های نورشیمیایی برای مشعل بنسن

محمد جواد اکبری *

آزاده کبریایی

علیرضا رنجبران

کارشناسی ارشد، بخش طراحی سیستم های احتراق، شرکت مهندسی و ساخت توربین مینا (توگا)، کرج، ایران، akbari.mohammadjavad@mapnaturbine.com

استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، kebriaee@sharif.ir

کارشناسی ارشد، مدیریت طراحی توربین گاز، شرکت مهندسی و ساخت توربین مینا (توگا)، کرج، ایران، ranjbaran.alireza@mapnaturbine.com

چکیده

روش نورشیمیایی یکی از روش های نوری شناخته شده و پر کاربرد در زمینه شناسایی سیستم های احتراقی است. در این پژوهش، سیگنال های نورشیمیایی CH^* و OH^* گونه های نشانگر نرخ گرمای آزاد شده، با استفاده از آشکارساز لوله تقویت کننده نور و سایر تجهیزات نوری برای یک مشعل بنسن تحقیقاتی اندازه گیری شده و همچنین اثر تغییرات نسبت هم آری و دبی جریان بر این سیگنال ها بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که با افزایش دبی جریان، سیگنال های CH^* و OH^* به صورت خطی افزایش می یابند. با تغییر نسبت هم آری نیز مشاهده شد که سیگنال های نورشیمیایی در شرایط نزدیک به استوکیومتری بیشینه می شود. بنابراین این دو گونه را می توان به عنوان نشانگر آهنگ گرمای آزاد شده در نظر گرفته و از آن جهت یافتن شرایط بهینه کاری برای هر مشعل دلخواه استفاده کرد. همچنین نشان داده شد که سیگنال OH^*/CH^* مستقل از تغییرات دبی جریان بوده و تنها تحت اثر نسبت هم آری است و رابطه کالیبراسیون بین نسبت هم آری و سیگنال OH^*/CH^* استخراج گردید. کاربرد روش نورشیمیایی به منظور شناسایی دینامیک سیستم های احتراقی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می دهد که شعله پیش آمیخته آرام دارای یک فرکانس بیشینه غالب ناشی از گردابه های کلوین هلمهولتز می باشد. در شعله های پیش آمیخته با افزایش نسبت هم آری فرکانس غالب کاهش یافته و دامنه متناظر با آن افزایش می یابد. همچنین با افزایش دبی جریان فرکانس ماکزیمم به صورت خطی افزایش یافته و دامنه آن نیز به صورت خطی کاهش می یابد. نتایج این کار پتانسیل استفاده از روش نورشیمیایی به عنوان ابزاری کارآمد در زمینه شناسایی تجربی سیستم های احتراقی و همچنین جهت کنترل و مانیتورینگ محفظه احتراق رقیق از سوخت و شناسایی پدیده های دینامیکی احتراق را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: شعله، نسبت هم آری، نورشیمیایی، رادیکال های احتراقی، فلیکر شعله، شناسایی احتراق.

Technique Implementation and Experimental Investigation of Chemiluminescence Emissions for Bunsen Burner

M. J. Akbari

A. kebriaee

A. R. ranjbaran

Combustion Division, MAPNA Turbine Engineering and Manufacturing Company (TUGA), Karaj, Iran

Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Gas Turbine Design Management, MAPNA Turbine Engineering and Manufacturing Company (TUGA), Karaj, Iran

Abstract

The Chemiluminescence method is considered as one of the most widely spread optical methods which is used for identifying combustion systems. In this study, the CH^* and OH^* Chemiluminescence signals were measured with the use of PMT detector and other optical equipments for a bunsen burner. Also the effect of equivalence ratio and flow rate on these signals have been investigated. The results show that with increasing flow rate, CH^* and OH^* signals increase linearly. By changing the equivalence ratio, Chemiluminescence signals were maximized near stoichiometric condition. Therefore, these two types signals can be considered as an the heat release rate indicator and can be used to find the optimal working conditions for any desired burner. It was also shown that OH^*/CH^* is independent of mass flow rate and only affected by the equivalence ratio. Then, the calibration relationship between equivalence ratio and OH^*/CH^* signal has been extracted for a certain range of equivalence ratio, which is also true in other combustion condition. Finally, the application of this method has been evaluated to identify the dynamics of combustion systems. The results show that the premixed flames have a dominant peak frequency due to the Kelvin-Helmholtz vortices. In premixed flames, the peak frequency is decreased by increasing the equivalence ratio and the corresponding amplitude increases. Also, with increasing flow rate, the peak frequency is linearly increased and its amplitude decreases linearly. This work shows the potential of using the Chemiluminescence method as an effective tool in the field of experimental identification of combustion systems, as well as for controlling and manitoring the lean of fuel combustion chamber and identifying dynamic combustion phenomena.

Keywords: Flame, Equivalence ratio, Chemiluminescence, Combustion Radicals, Flame Flicker, Combustion Diagnostics.

طیف نگاری شعله توسط پژوهشگران انجام شده که نتیجه کلی همه این تحقیقات ثابت می کند تابش های گسیل شده از شعله می تواند مانند اثر

۱- مقدمه

شعله حتی در ساده ترین ترکیب و شرایط جریان، طیف نور خاصی از خود منتشر می دهد. از همین رو تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: akbari.mohammadjavad@mapnaturbine.com.

تاریخ دریافت: ۱۳/۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۲۰/۵/۳۰

انگشت برای شناسایی پارامترهای شعله، مورد استفاده قرار گیرد. به عبارتی دیگر تغییر در پارامترهای شعله مانند نسبت هم‌ارزی^۱، ترکیب سوخت، فشار و نوع برنر موجب تغییر در طیف‌های گسیل شده از شعله خواهد شد.

اخیرا استفاده از روش‌های متنوع اپتیکی برای شناسایی در زمینه احتراق به منظور اندازه‌گیری پارامترهای مهمی چون دما، میدان سرعت، غلظت سنجی و ... گسترش یافته است، چراکه این روش‌ها غیرتداخلی و دارای پاسخ زمانی مناسب بوده و همچنین با توجه به دقت تجهیزات نوری مورد استفاده، می‌توانند دارای حد تفکیک مکانی بالا نیز باشند. یکی از مهمترین زمینه‌ها در شناسایی پدیده‌های احتراقی، غلظت‌سنجی بوده و روش‌های اپتیکی مختلفی نیز برای این امر توسعه داده شده است که از پرکاربردترین آنها می‌توان به روش‌های لیزر-پایه مانند فلورسانس القا شده با لیزر^۲ و یا پراکندگی رامان^۳ اشاره نمود. از جمله مشکلات این روش‌های پیشرفته می‌توان به پیچیده بودن فرایند تست و هزینه بالای منبع نور لیزر و دوربین سرعت بالا اشاره کرد.

در کنار این روش‌ها، امروزه روش نوری نورشیمیایی^۴ به منظور مطالعه کیفی و نیمه‌کمی غلظت گونه‌های احتراقی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱]. مبنای این روش، اندازه‌گیری شدت نور تابیده شده از رادیکال‌های میانی حاصل از احتراق در فرایند پایدار شدن آنها می‌باشد (این گونه‌های برانگیخته ناپایدار بوده و برای پایدار شدن، الکترون‌های برانگیخته شده از مدارهای بالا به مدار پایه بازگشته و اختلاف انرژی بین مدارهای آنها به صورت بسته‌های فوتونی با طول مشخص ساطع می‌شود). میزان شدت نور تابیده شده از هر گونه نورشیمیایی با مقدار غلظت آن متناسب بوده و بنابراین با استفاده از این روش می‌توان توزیع غلظت گونه‌های میانی احتراق را بررسی کرد. مزیت اصلی این روش غیرمخرب نسبت به سایر روش‌های نوری لیزر-پایه، ساده و ارزان بودن آن می‌باشد.

مهمترین گونه‌های نورشیمیایی در شعله‌های هیدروکربنی رادیکال‌های OH^* ، CH^* و C_2^* هستند [۲]. مقدار تابش نورشیمیایی هر کدام از این رادیکال‌ها و نسبت آن‌ها، حاوی اطلاعات مهمی در مورد نرخ واکنش‌های شیمیایی، آهنگ آزاد شدن گرما^۵، نسبت هم‌ارزی محلی، توزیع دما، محل شعله و درجه اختلاط است. گیدون و وولفهارد [۳-۱] تغییرات تابش‌های گسیل شده توسط OH^* ، CH^* و C_2^* را در ناحیه واکنشی شعله‌های اکسی‌استیلین به روش طیف‌سنجی شعله مورد بررسی قرار دادند. ایشان با تجزیه و تحلیل داده‌های بدست آمده و بررسی ارتباط آنها با نسبت هم‌ارزی، نشان دادند که هر یک از رادیکال‌های مورد بررسی در یک نسبت هم‌ارزی مشخص بیشترین تابش را از خود ساطع می‌کنند. آنها مقدار بیشینه تابش برای رادیکال‌های OH^* ، CH^* و C_2^* به ترتیب در نسبت هم‌ارزی ۱/۴۳، ۱/۶۹ و ۲/۳۸ اندازه‌گیری و گزارش کردند. این یافته‌های اولیه، پایه‌گذار شناخت کلی

از رفتار تابش‌های نورشیمیایی شعله گردید. ایشان همچنین نشان دادند که مستقل از ترکیب شیمیایی سوخت هیدروکربنی مورد بررسی، همواره نسبت هم‌ارزی متناظر با بیشینه شدت تابش هر گونه، برای رادیکال OH^* کمتر از CH^* و CH^* کمتر از C_2^* می‌باشد.

هیگینز و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۱ اثر نسبت هم‌ارزی و فشار را بر روی تابش‌های نورشیمیایی شعله مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که از رابطه بین سیگنال‌های نورشیمیایی و پارامترهایی مانند فشار و نسبت هم‌ارزی می‌توان در زمینه کنترل سیستم‌های احتراقی مانند توربین گاز استفاده کرد. همچنین ایشان نشان دادند که در شرایط واقعی می‌توان از حسگر نورشیمیایی در سیستم یکپارچه کنترل توربین گاز به منظور مانیتورینگ فرایند احتراق جهت کاهش تولید آلاینده اکسید نیتروژن بهره برد. اخیرا بیشترین تمرکز در حوزه طیف‌سنجی شعله، مربوط به اندازه‌گیری محلی تابش‌های نورشیمیایی سیستم‌های احتراقی بوده و به همین دلیل نیز سیستم‌های اپتیکی مختلفی توسط پژوهشگران متعدد، توسعه داده شده است. آکاماتسو و همکارانش [۵] سیستم نوری جدیدی به نام کاسگرین^۶ توسعه دادند. این سیستم قابلیت تفکیک در ابعاد کمتر از میلی‌متر داشته و امکان تعیین توزیع محلی تابش‌های نورشیمیایی شعله با دقت بالا، را فراهم می‌سازد. هاردالوپاس و اورین [۶] با استفاده از این سیستم، توانستند نشان دهند که گسیل C_2^* شاخص مناسبی برای تشخیص تغییرات گرمای آزاد شده نیست در حالیکه هر کدام از رادیکال‌های OH^* و CH^* معرف مناسبی برای این پارامتر هستند. آن‌ها همچنین اظهار کردند که نسبت OH^*/CH^* بصورت یکتواختی به نسبت هم‌ارزی وابسته بوده و تحت تاثیر نرخ دبی جریان شعله نمی‌باشد. هاردالوپاس و همکارانش [۷] در آزمایش بعدی خود قابلیت بالای حسگر کاسگرین را در تعیین نسبت هم‌ارزی محلی درون محفظه احتراق توربین‌های گازی صنعتی را مورد بررسی قرار دادند. آنها مطالعه جامعی را با استفاده از لنز کاسگرین به منظور شناسایی موقعیت ناحیه واکنشی احتراق، آهنگ آزاد سازی گرما و نسبت هم‌ارزی محلی برای یک بنسن برنر^۷ و سپس مدل محفظه احتراق توربین گاز با مشعل پایدارشونده- چرخشی^۸ انجام دادند. ایشان همچنین نتایج خود را با نتایج حاصل از سیستم پیشرفته اپتیکی فلورسانس تحریک شده با لیزر صفحه‌ای^۹ مقایسه کرده و نشان دادند که روش نورشیمیایی از دقت بسیار بالایی برخوردار است. کمال [۸] در سال ۲۰۲۰ تکنیک نورشیمیایی را جهت استخراج توزیع محلی نسبت هم‌ارزی در شعله آشفته به کار بردند. وی با استفاده از یک دوربین CCD و با اندازه‌گیری دو کانال CH^* و CO_2^* ابتدا رابطه کالیبراسیون را استخراج کرده و سپس از نسبت این دو سیگنال جهت اندازه‌گیری توزیع نسبت هم‌ارزی محلی و سپس تخمین توزیع سه-بعدی نسبت هم‌ارزی با استفاده از تبدیل ابل^{۱۰} استفاده کردند.

در سال‌های اخیر استفاده از روش نورشیمیایی برای شرایط احتراقی مختلف و همچنین بررسی پارامترهای مختلف توسعه یافته است. یانگ و همکاران [۹] روش نورشیمیایی را برای یک مشعل

⁶ Cassegrian

⁷ Bunsen burner

⁸ Swirl-Stabilized

⁹ PLIF

¹⁰ Abel transform

¹ Equivalence ratio

² Laser induced fluorescence

³ Raman scattering

⁴ Chemiluminescence

⁵ Heat release rate

استفاده از اثر سیگنال نورشیمیایی OH^* برای یک محفظه احتراق پیش‌آمیخته رقیق از سوخت، ارائه نمود. وی از پارامترهای آماری مختلف داده‌های مربوط به سیگنال OH^* در طول زمان برای تقریب شرایط کاری کنده شدن شعله، استفاده نمود. ایشان بر مبنای الگوریتم توسعه داده شده برای پیش‌بینی کنده شدن شعله، الگوریتمی کنترلی نیز به منظور عدم نزدیک شدن محفظه احتراق به این شرایط ارائه داد. در سال‌های بعد نیز این زمینه استفاده از سیگنال‌های نورشیمیایی مورد توجه بیشتر قرار گرفته و پژوهش‌های بیشتری در این زمینه انجام شد [۱۸ و ۱۹].

همانگونه که ذکر شد تاکنون مطالعات گوناگونی در زمینه تابش‌های نورشیمیایی شعله انجام شده است اما دلیل خلا زیرساختی در زمینه اندازه‌گیری شدت تابش‌های نورشیمیایی حاصل از احتراق در داخل کشور، سعی شد که زیرساخت لازم برای استفاده صنعتی از این روش که به صورت هم‌زمان اندازه‌گیری با فرکانس بالا و با بازدهی انتقال نوری بسیار مناسب را در دو کانال مقدور می‌سازد، توسعه یابد. در پژوهش حاضر، قصد بر این است که تکنیک نورشیمیایی برای شناسایی مشخصه‌های احتراقی یک مشعل نمونه بنسن پیاده‌سازی شده و رابطه بین پارامترهای فیزیکی شعله (مانند نسبت هم‌آرزی، دبی جریان و نوع سوخت) و سیگنال‌های نورشیمیایی، مورد بررسی قرار گیرد. همچنین دینامیک ذاتی بنسن برنر با استفاده از این روش مورد مطالعه قرار گرفته و فرکانس نوسان آن استخراج شده و تغییرات آن نسبت به تغییر پارامترهای احتراقی نیز تعیین می‌گردد. استخراج رابطه کالیبراسیون بین OH^*/CH^* و نسبت هم‌آرزی، اندازه‌گیری هم‌زمان رادیکال OH^* و CH^* و پدیده شناسی نوسان طبیعی مشعل بنسن با استفاده از این تکنیک از نکات بدیع کار حاضر می‌باشد.

۲- تجهیزات و چیدمان آزمایشگاهی

۲-۱- چیدمان احتراق

شکل ۱ طرحواره چیدمان احتراقی و سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل جریان سوخت و هوا را نشان می‌دهد. این سیستم به صورت کلی شامل بخش‌های تامین، اندازه‌گیری و کنترل جریان سوخت و هوای ورودی برنر می‌شود. با توجه به مشابهت شرایط پیش‌آمیخته مشعل بنسن ساده با احتراق در توربین‌های گازی رقیق از یک نمونه از این مشعل در آزمایشات استفاده شده است. مشعل بنسن شامل یک محفظه استوانه‌ای به طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۳۴ میلی‌متر می‌شود که در خروجی آن یک نازل همگرا نصب شده است طوری که ترکیب هوا و سوخت از مقطع با قطر ۱۴ میلی‌متر خارج می‌شود. هوای مورد نیاز توسط یک مخزن ۸ بار با حجم ۱۰۰۰ لیتر که از یک کمپرسور تغذیه می‌شود، تأمین می‌شود. از خط گاز شهری با فشار ۴ بار نیز به منظور تأمین سوخت سیستم استفاده می‌شود. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود به منظور حذف کامل نوسانات احتمالی خط سوخت و هوا، فشار هر دو خط در دو مرحله شکسته می‌شود. از تجهیز روتامتر به منظور اندازه‌گیری دبی سوخت و هوا استفاده می‌شود. به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری سوخت و هوا، حسگر فشار در هر دو خط قبل از روتامتر نصب شده و فشار هوا و سوخت ورودی به روتامتر نیز به صورت برخط پایش و اندازه‌گیری می‌شود که از آن جهت

نفوذی CH_4/O_2 رقیق شده با CO_2 و با استفاده از دوربین در سه کانال OH^* ، CH^* و CO_2 پیاده‌سازی کردند. ایشان نشان دادند که در شرایط شعله نفوذی آرام تغییرات نسبت هم‌آرزی کلی و درصد CO_2 اضافه شده، شکل و ضخامت لایه CH^* را تغییر چندانی نمی‌دهد در حالی که تغییرات در کانال OH^* بسیار محسوس است. آنها همچنین نشان دادند که بیشینه نسبت OH^*/CH^* به صورت خطی با افزایش نسبت هم‌آرزی کلی کاهش یافته و با افزایش درصد CO_2 اضافه شده به صورت نمایی کاهش می‌یابد. لیو و همکاران [۱۰] رابطه بین سیگنال‌های نورشیمیایی یک شعله چرخشی ۱ پیش‌آمیخته را با مقدار آلاینده NO_x تولیدی آن مورد واکاوی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که ساختار شعله، میزان NO_x و همچنین سیگنال‌های نورشیمیایی نسبت به تغییر نسبت هم‌آرزی و عدد چرخش ۲ حساس هستند. ایشان نشان دادند که در شرایط کاری مختلف رابطه خطی میان مقدار NO_x و سیگنال CH^* و OH^* وجود دارد. شناسایی احتراق در سایر شرایط احتراقی و همچنین اثر پارامترهای مختلف مانند احتراق در فشار بالا [۱۱]، اثر ترکیب سوخت متفاوت [۱۲] و همچنین موتورهای احتراق داخلی [۱۳] با استفاده از روش نورشیمیایی مورد مطالعه قرار گرفته است.

از سوی دیگر همواره نوسانات سیستم‌های احتراقی، یکی از زمینه‌های مورد مطالعه پژوهشگران بوده است. فرکانس نوسانات شعله، نشانگر نوسان در سایر پارامترهای احتراقی همچون فشار، دما، تابش، آهنگ گرمای آزاد شده بوده و از این رونقش مهمی در ساختار شعله، میدان تابشی و بازده حرارتی دارد. لذا با اندازه‌گیری رادیکال‌های شیمیایی OH^* و CH^* ، می‌توان رفتار نوسانی سیستم‌های احتراقی را نیز مورد بررسی قرار داد. هانگ و همکاران [۱۴] الگوریتمی برای مانیتور کردن برخط فلیکر^۳ شعله معرفی کردند. ایشان با استفاده از یک دوربین پرسرعت و پردازش تصاویر، فلیکر شعله نفوذی و پیش-آمیخته و همچنین تغییرات این پارامتر را نسبت به قطر نازل شعله و نسبت هم‌آرزی بررسی کردند. هانگ [۱۵] نیز همان ستاپ و الگوریتم مرجع [۱۴] را در شرایط تصویربرداری با فیلتر CH^* و بدون آن انجام داده و نشان داد نتایج این دو حالت تطابق بسیار مناسبی با هم دارند. گوش و همکاران [۱۶] نیز با استفاده از سیستم دوربین پرسرعت و سنسور لوله تقویت کننده نور، نوسانات شعله را بررسی کردند. ایشان داده‌های تجربی را هم در فضای زمان و هم در فضای فرکانس تحلیل کرده و نشان دادند که نتایج حاصل از دو نوع آشکارساز شباهت بسیار زیادی به هم دارند.

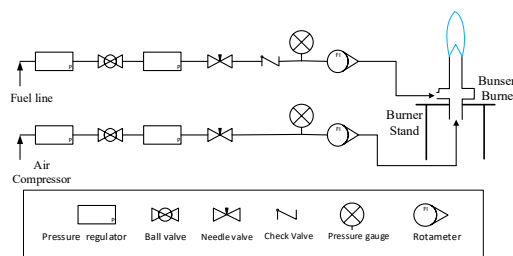
امروزه یکی از چالش‌های مهم محفظه احتراق توربین‌های گازی رقیق از سوخت، پایداری آن است و از همین رو تحقیقات زیادی برای پیش‌بینی کنده شدن شعله در این سیستم‌های احتراقی انجام شده است و روش‌های مختلفی نیز برای این امر با استفاده از سیگنال‌های نورشیمیایی پیشنهاد شده است. مورگاناندام [۱۷] الگوریتمی به منظور پیش‌بینی حد کنده شدن شعله در شرایط رقیق از سوخت و با

^۱ Swirl flame

^۲ Swirl number

^۳ Flicker

استخراج ضرب اصلاح روماتر^۱ استفاده می‌شود.



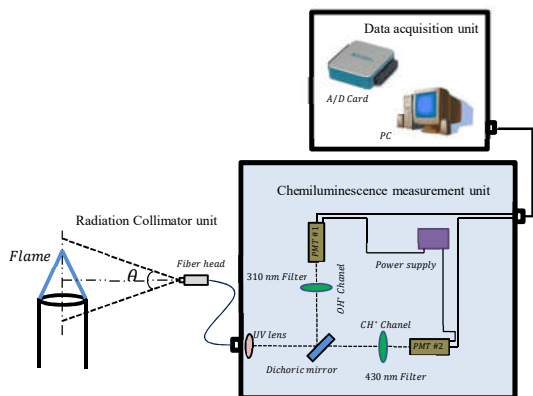
شکل ۱- طرحواره مشعل و سیستم کنترل و اندازه گیری جریان

۲-۲- چیدمان نورشیمیایی

ادوات و چیدمان اندازه‌گیری نورشیمیایی شامل سه بخش سیستم جمع‌آوری و هدایت نور، سیستم اندازه‌گیری سیگنال نورشیمیایی و سیستم داده‌برداری می‌شود. شکل ۲ طرحواره چیدمان نورشیمیایی شعله را نشان می‌دهد. برای جمع‌آوری همه‌ی نور ساطع شده از شعله، از فیبر نوری خریداری شده از شرکت ادموند اپتیکس^۲ استفاده می‌شود. فیبر نوری با قطر ۱۰۰۰ میکرون و زاویه پذیرش (θ) ۲۵/۴ درجه در این کار استفاده شده است. فاصله فیبرنوری از شعله با توجه به این زاویه و بیشینه طول شعله به گونه‌ای تنظیم می‌شود که تمام شعله در میدان دید فیبرنوری قرار گیرد. یکی از پارامترهای مهم انتخاب المان‌های نوری مورد استفاده میزان بازدهی انتقال نوری آن‌ها می‌باشد که به صورت نسبت میزان نوری خروجی به میزان نور ورودی تعریف می‌شود. میزان بازدهی انتقال فیبر نوری مورد استفاده در کانال OH* (طول موج ۳۱۰ نانومتر) و CH* (طول موج ۴۳۰ نانومتر) به ترتیب ۹۶٪ و ۹۹٪ درصد می‌باشد. تابش جذب شده شعله با همان زاویه پذیرش وارد شده، از فیبر نوری خارج می‌شود. به جهت کاهش اتلاف نوری و همچنین هدایت نور اخذ شده به آشکارساز از یک تبدیل کننده نوری (مدل A10037-11 از شرکت هاماماتسو^۳) که حاوی یک لنز خاص بوده و نور خارج شده از فیبر نوری را به صورت بیم موازی در می‌آورد استفاده می‌شود. بازدهی این المان در هر دو کانال OH* و CH* به ترتیب ۹۱٪ درصد می‌باشد.

از یک آینه دو رنگ^۴ به منظور تقسیم نور شعله در دو کانال برای اندازه‌گیری همزمان تابش از گونه‌های OH* و CH* استفاده می‌شود. این نوع آینه خاص هنگامی که تحت زاویه ۴۵ درجه نسبت به نور قرار می‌گیرد، بازه‌ای از طول موج‌های مشخص را از خود عبور داده و بازه‌ای از آنها را نیز از خود منعکس می‌کند. نمونه استفاده شده مدل DMSP805R از شرکت تورلبس^۵ می‌باشد. نور در طول موج ۳۱۰ نانومتر با بازده انتقال ۹۸ درصد از این آینه منعکس شده و در طول موج ۴۳۰ نانومتر با بازده ۹۶ درصد از آن عبور می‌کند. پس از تقسیم نور، تشعشعات با استفاده از تجهیز فیلتر نوری در دو کانال OH* و CH* فیلتر می‌شوند. فیلتر با طول موج مرکزی ۳۱۰ نانومتر و پهنای

باند ۱۰ نانومتری برای رادیکال OH* (مدل ۹۷۶-۳۴ از شرکت ادموند) و طول موج مرکزی ۴۳۰ نانومتر و پهنای باند ۱۰ نانومتر برای رادیکال CH* (مدل ۱۳۷-۶۵ از شرکت ادموند) استفاده می‌شوند. بازده انتقال نور فیلتر CH* و OH* به ترتیب برابر با ۷۲/۵ و ۱۲/۱۳ درصد است. پس از فیلترینگ، با استفاده از آشکارساز لوله تقویت‌کننده‌ی نوری بدلیل پاسخ زمانی مناسب و حساسیت مطلوب آن، تشعشعات متناظر با رادیکال‌های نورشیمیایی، اندازه‌گیری می‌شوند. بازدهی انتقال نوری کل سیستم برای کانال OH* و CH* به ترتیب ۱۰/۳ و ۶۲ درصد می‌باشد.



شکل ۲- طرحواره ستاپ و تجهیزات اندازه‌گیری سیگنال نورشیمیایی شعله

داده‌برداری از سیگنال خروجی آشکارساز توسط کارت داده برداری مدل ۹۲۰۶ نشنال انسترومنت^۷ انجام می‌شود. بیشینه فرکانس داده‌برداری کارت مورد استفاده ۲۵۰ کیلوهرتز و خطای آن ۱۷۴ میکروولت می‌باشد. برای کنترل شرایط داده‌برداری، تنظیم فرکانس و تعداد نمونه‌ها از یک نرم افزار که با استفاده از لب ویو^۸ توسعه داده شده است، استفاده می‌شود. تمامی آزمون‌ها در فشار مطلق ۰/۸۸۵ بار و دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام شده است. فرکانس داده‌برداری در تمامی شرایط آزمون ۲۰۰۰۰ هرتز می‌باشد. در این پژوهش مقدار متوسط سیگنال خروجی حسگر، ملاک بررسی قرار می‌گیرد. به منظور کمینه کردن اثرات نور محیط بر اندازه‌گیری، تمامی آزمون‌ها در اتاق تاریک گرفته می‌شوند و مقدار متوسط سیگنال پس‌زمینه از سیگنال‌های هر آزمون کسر می‌شود. لازم به ذکر است نتایج هر نقطه سه بار تکرار شده است و میانگین آن‌ها گزارش شده است.

۳- آنالیز عدم قطعیت

هر کمیتی که به صورت تجربی اندازه‌گیری می‌شود دارای خطا می‌باشد. خطای اندازه‌گیری شامل دو جز می‌شود: خطای اتفاقی (e) که به صورت تصادفی در هر آزمون وجود دارد و خطای سیستماتیک (β) که به صورت تکرارپذیر در هر آزمون وجود دارد (خطای کالیبراسیون) [۲۰]. خطای کل (δ) از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۰]:

^۱ Correction factor

^۲ Edmund Optics

^۳ Acceptance angle

^۴ Hamamatsu

^۵ Dichroic mirror

^۶ Thorlabs

^۷ National Instrument

^۸ Lab view

جدول ۱- نقاط انجام تست‌ها به منظور بررسی اثر نسبت هم‌ارزی

$\phi_{@m_{CH_4}=10 \text{ mg/s}}$	$\dot{m}_{air}(\text{g/s})$	#
1.66	0.10	1
1.48	0.12	2
1.33	0.13	3
1.21	0.14	4
1.17	0.15	5
1.02	0.17	6
0.95	0.18	7
0.88	0.19	8

جدول ۲- نقاط انجام تست‌ها به منظور بررسی اثر دبی جریان

$\dot{m}_{air}(\text{g/s})$	$\dot{m}_{CH_4}(\text{mg/s})$	$\phi = 1$
0.17	10.00	1
0.20	11.96	2
0.22	12.96	3
$\phi = 1.2$		
0.14	10.00	1
0.17	11.96	2
0.20	13.96	3
0.23	15.95	4

۴-۱- بررسی تغییرات رادیکال‌های شیمیایی نسبت به

تغییرات شرایط احتراقی

تغییرات نورشیمیایی گونه CH^* که با نسبت مقدار سیگنال در شرایط استوکیومتری بی‌بعد شده است، در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۸۸ تا ۱/۰۲ شرایط احتراقی از حالت رقیق از سوخت به شرایط استوکیومتری و احتراق کامل نزدیک شده و در نتیجه سیگنال نورشیمیایی CH^* نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۱/۰۲ تا ۱/۴، هر چه از شرایط استوکیومتری فاصله بیشتری گرفته می‌شود، سیگنال CH^* نیز کاهش می‌یابد زیرا شدت احتراق ضعیفتر شده و گرمای کمتری نیز آزاد می‌شود. در شرایط $\phi > 1.4$ سیگنال CH^* حساسیت خود را از دست داده و عملاً بدون تغییر می‌ماند که این رفتار در پژوهش‌های پیشین نیز مشاهده شده است [۲۱]. پیش‌بینی می‌شود دلیل عمده این مشاهده اثر تابش‌های پس زمینه گونه CO_2^* باشد چون با افزایش نسبت هم‌ارزی در شرایط غنی از سوخت، تابش از گونه CO_2^* نیز افزایش می‌یابد. از طرفی سیگنال CH^* در شرایط بسیار نزدیک به استوکیومتری و قسمت غنی از سوخت آن بیشینه می‌شود که این نتیجه نیز در سایر کارهای تجربی نیز مشاهده شده است [۲۲]. دلیل این امر این است که مسیر تشکیل رادیکال CH^* به مولکول C_2 نیاز دارد [۲۳] و این گونه نیز در قسمت غنی از سوخت شرایط استوکیومتری بیشینه است.

$$\delta = \mp \sqrt{\epsilon^2 + \beta^2} \quad (1)$$

اگر کمیتی خود وابسته به چند کمیت دیگر باشد، با استفاده از روش انتشار خطا [۲۰] می‌توان خطای کمیت وابسته را با استفاده از معلوم بودن خطای کمیت‌های مستقل محاسبه کرد:

$$f = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \delta f = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \quad (2)$$

در چیدمان آزمایشی حاضر، خطای سیستماتیک گزارش شده از کالیبراسیون روماتر هوا و سوخت به ترتیب ۱٪ و ۲/۵٪ در مقیاس کل^۱ می‌باشد. مقدار خطای رندم عمدتاً ناشی از خطای تنظیم دبی توسط کاربر فرض شده و مقدار آن نیز ۱٪ فرض می‌شود. بنابراین با استفاده از رابطه (۱) عدم قطعیت اندازه‌گیری دبی هوا و سوخت به ترتیب ۱/۴۲ و ۲/۷ درصد است. خطای نسبت هم‌ارزی نیز با استفاده از رابطه (۲) و با فرض ثابت بودن چگالی هوا و سوخت برابر با ۳/۰۵ درصد است.

از یک منبع نور ال ای دی که با اختلاف ولتاژ ثابت (و در نتیجه شدت نور ثابت) تغذیه می‌شود برای بررسی میزان عدم قطعیت داده‌های خروجی لوله تقویت کننده نور استفاده شد. مقدار انحراف معیار داده‌های لوله تقویت کننده نور از سیگنال نوری LED بیانگر میزان عدم قطعیت داده‌های لوله تقویت کننده نور می‌باشد. با استفاده از داده‌های استخراج شده از آشکارساز مشخص گردید که مقدار عدم قطعیت این ابزار برابر ۳/۵۵ درصد است.

۴- نتایج و بحث

اندازه‌گیری نورشیمیایی شعله بنسن با توجه به محدودیت مربوط به پایداری این مشعل (پریدن^۲ و یا پس‌زدن^۳ شعله) تنها در نقاط خاصی انجام می‌شود. دبی جریان و نسبت هم‌ارزی از مهمترین پارامترهایی هستند که تغییرات تابش‌های نورشیمیایی نسبت به آنها در این پژوهش بررسی خواهد شد و بنابراین نقاط انجام تست‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که این مورد را ممکن سازد. قسمت اول این بخش، نتایج مربوط به تست‌های نورشیمیایی رادیکال‌های OH^* و CH^* نسبت به تغییرات نسبت هم‌ارزی و دبی جریان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و همچنین رابطه نسبت هم‌ارزی و دبی جریان با نسبت سیگنال OH^*/CH^* نیز بررسی می‌شود. در قسمت دوم نیز نتایج مربوط به دینامیک شعله پیش‌آمیخته و نفوذی با استفاده از این روش مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

¹ Full scale

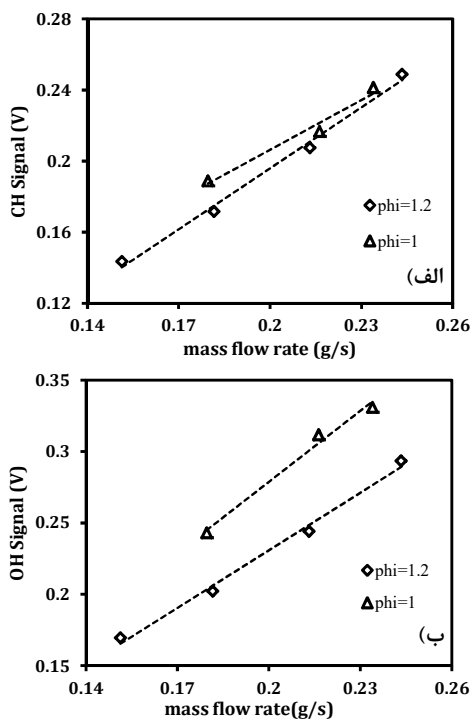
² Blow out

³ Flash back

باشد. بنابراین کاربرد این روش اساساً برای کنترل و مانیتور در سیستم-های احتراقی رقیق از سوخت مانند توربین‌های گازی مناسب می‌باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از برازش منحنی به شکل تابع نمایی، رابطه کالیبراسیون در بازه $0.88 < \phi < 1.1$ استخراج شده که این رابطه در معادله (۳) نشان داده شده است.

$$\frac{OH^*}{CH^*} = 34.8e^{-3.152\phi} + 5.182 \times 10^{-10} e^{17.71\phi} \quad (3)$$

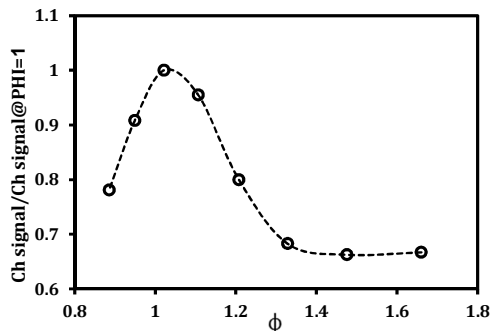
این معادله در بازه $0.88 < \phi < 1.1$ چه به صورت محلی و چه کلی و همچنین شرایط ناپایا برای ارتباط بین سیگنال OH^*/CH^* و نسبت هم‌ارزی صادق است که برای استخراج نسبت اختلاط محلی نیاز به توسعه سیستم نوری برای گرفتن نور از نقطه مورد نظر در شعله می‌باشد [۶، ۲۵]. با استفاده از این رابطه می‌توان با استخراج محلی نسب سیگنال‌های مذکور، نسبت هم‌ارزی را به صورت محلی استخراج کرد.



شکل ۴- تغییرات سیگنال (الف) CH^* و (ب) OH^* بر حسب دبی جریان

۲-۴- بررسی فلیکس شعله

در این بخش رفتار نوسانی شعله پیش‌آمیخته مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو گونه OH^* و CH^* نشانگر احتراق بوده و بنابراین هر نوسانی که در شعله وجود داشته باشد و ناشی از هر عاملی باشد، بر این سیگنال‌ها اثر مستقیم داشته و با استفاده از این سیگنال‌ها می‌توان رفتار دینامیکی شعله را بررسی کرد.



شکل ۳- تغییرات سیگنال CH^* بر حسب نسبت هم‌ارزی در شرایط $\dot{m}_f = 10 \text{ mg/s}$

شکل ۴ نمودار تغییرات سیگنال OH^* و CH^* بر حسب دبی جریان برای دو نسبت هم‌ارزی متفاوت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی جریان در هر دو نسبت هم‌ارزی، سیگنال OH^* و CH^* نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد؛ البته شیب آن‌ها متفاوت بوده و به نسبت هم‌ارزی بستگی دارد. در شرایطی که دما و فشار سوخت و هوای ورودی برز و نسبت هم‌ارزی ثابت باشد، حرارت آزاد شده از شعله با دبی جریان احتراقی رابطه مستقیم دارد. مشابه شکل ۳ ملاحظه می‌گردد که سیگنال نورشیمیایی در شرایط حدود استوکیومتری که آهنگ گرمای آزاد شده و شدت احتراق نیز بیشینه است، بیشترین مقدار را دارد. بنابراین سیگنال OH^* و CH^* نشانگر بسیار مهمی برای آهنگ گرمای آزاد شده از شعله می‌باشند. این حقیقت در مطالعات کیفی و کمی برای یافتن شرایط بهینه احتراقی برای طراحی سیستم‌های احتراقی و همچنین مطالعات دینامیک احتراق بسیار حائز اهمیت است و به عنوان یکی از مهمترین کاربردهای روش نورشیمیایی نیز معرفی می‌شود.

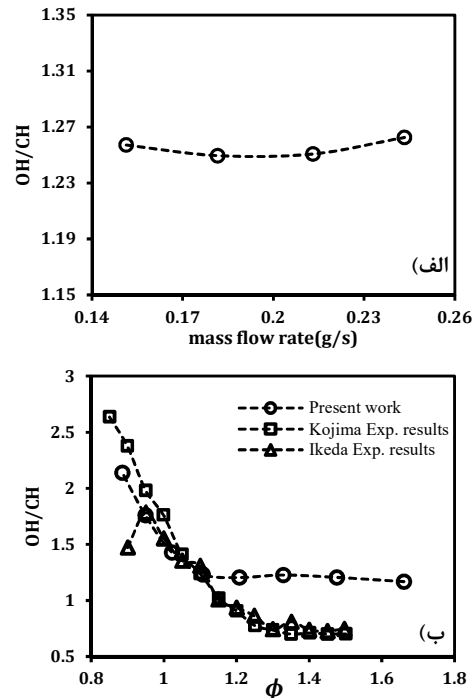
یکی از پارامترهای مهم در روش نورشیمیایی بررسی اثر پارامترهای احتراقی بر نسبت سیگنال‌های نورشیمیایی و از جمله نسبت OH^*/CH^* می‌باشد. شکل ۵ (الف) تغییرات سیگنال OH^*/CH^* بر حسب دبی جریان در نسبت هم‌ارزی ثابت ۱/۲ را نشان می‌دهد. اختلاف بیشینه و کمینه مقدار سیگنال OH^*/CH^* در این شرایط حدود یک درصد است. بنابراین نسبت OH^*/CH^* مستقل از دبی جریان بوده و تنها به سیستم اپتیکی، نوع سوخت و نسبت هم‌ارزی جریان وابسته است. این نتیجه در پژوهش‌های پیشین و برای سیستم‌های احتراقی مختلف نیز ثابت شده است [۶، ۲۱، ۲۴]. شکل ۵ (ب) تغییرات سیگنال OH^*/CH^* بر حسب نسبت هم‌ارزی که معمولاً به آن نمودار کالیبراسیون گفته می‌شود، را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در ناحیه $0.88 < \phi < 1.1$ سیگنال OH^*/CH^* روند کاهشی داشته و البته حساسیت بالایی در این ناحیه دارد. در ناحیه نسبت هم‌ارزی بزرگتر از ۱/۱ سیگنال OH^*/CH^* تقریباً حساسیت چندانی به تغییرات نسبت هم‌ارزی نشان نمی‌دهد. نتایج کارهای کوچیما [۲۵]، آکدا [۲۶] برای سیگنال OH^*/CH^* نیز در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است. نمودار کالیبراسیون در محدوده حساس به نسبت هم‌ارزی برای سه پژوهش تطابق مناسبی دارند هر چند که محدوده حساسیت آن تفاوت جزئی با یک دیگر دارند. این تفاوت ناشی از متفاوت بودن مشعل مورد استفاده در هر پژوهش می‌-

برای سیگنال‌های OH^* ، CH^* و شرایط بدون فیلتر و همچنین تغییرات آنها نسبت به نسبت هم ارزی و دبی جریان، رسم شده‌اند. با توجه به شکل ۸(الف) و بر اساس نتایج سیگنال OH^* می‌توان گفت که با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۸۸ تا ۱/۶۶ مقدار فرکانس غالب از ۱۷/۴ تا ۱۲/۸ کاهش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار فرکانس غالب با استفاده از سیگنال فیلترشده OH^* و CH^* دقیقاً بر هم منطبق هستند که این نتیجه کاملاً مورد انتظار نیز است زیرا هر کدام از این سیگنال‌ها نشانگر احتراق هستند. از طرفی فرکانس غالب بدست آمده از سیگنال بدون فیلتر نیز رفتار مشابهی با نتایج حاصل از دو رادیکال نورشیمیایی داشته و در ۴ نقطه نیز دقیقاً برابر با مقادیر حاصل از سیگنال رادیکال نورشیمیایی است، ولی در سایر نقاط دارای خطا می‌باشد که بیشترین آن در نسبت هم‌ارزی ۱/۳۲ و حدوداً ۳ درصد است. بنابراین در شرایط نوسان طبیعی شعله می‌توان از سیگنال بدون فیلتر نیز با دقت بسیار مناسبی برای بررسی فلیکر شعله استفاده کرد.

با توجه به شکل ۸(ب) نیز می‌توان گفت که با افزایش نسبت هم‌ارزی مقدار دامنه متناظر با فرکانس غالب افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان بدین صورت توضیح داد که با افزایش نسبت هم‌ارزی در قسمت غنی از سوخت، سرعت سوختن شعله کاهش یافته و طول شعله نیز افزایش می‌یابد. این عامل سبب می‌شود که شدت آشفته‌گی بیشتر شده و در نتیجه شدت نوسان شعله نیز افزایش یابد. بنابراین با افزایش نسبت هم‌ارزی شدت فلیکر شعله نیز افزایش می‌یابد. همچنین از طرفی دیگر مشاهده می‌شود که مقدار دامنه در نسبت هم‌ارزی ۰/۸۸ و ۰/۹۴ (کمتر از ۰/۰۰۵)، ولی با این وجود داده‌های مربوط به سیگنال‌های نورشیمیایی این فرکانس غالب با دامنه بسیار کم را نیز شناسایی کرده‌اند که این مطلب دقت و قدرت این روش برای شناسایی دینامیک شعله را نشان می‌دهد. شکل ۹(الف) تغییرات فرکانس غالب نسبت به تغییرات دبی جریان را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دید که در هر دبی مشخص، فرکانس غالب نسبت هم‌ارزی ۱ بیشتر از ۱/۲ بوده و همچنین در هر نسبت هم‌ارزی مشخص با افزایش دبی جریان، فرکانس غالب نیز به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. شکل ۹(ب) نیز تغییرات دامنه نرمال شده متناظر با فرکانس غالب را نسبت به تغییرات دبی جریان نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در هر نسبت هم‌ارزی مشخص با افزایش دبی جریان، دامنه نرمال شده به صورت خطی کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش نورشیمیایی به عنوان یکی از روش‌های اپتیکی شناخته شده و پرکاربرد در زمینه شناسایی نوری سیستم‌های احتراقی پیاده‌سازی شده و با استفاده از آن تابش‌های نورشیمیایی شعله بنسن برنر تحقیقاتی، شناسایی شده و همچنین اثر پارامترهای احتراقی دبی جریان و نسبت هم‌ارزی بر این تابش‌ها نیز بررسی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که سیگنال CH^* با کاهش نسبت هم‌ارزی در قسمت غنی از سوخت، افزایش یافته و همچنین حساسیت آن بیشتر می‌شود و سپس در شرایط حدود استوکیومتری و غنی از سوخت بیشینه شده و پس از آن نیز کاهش می‌یابد. همچنین نشان

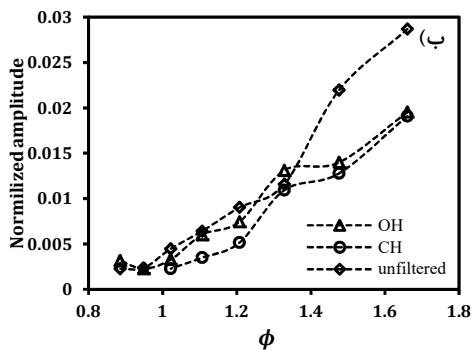
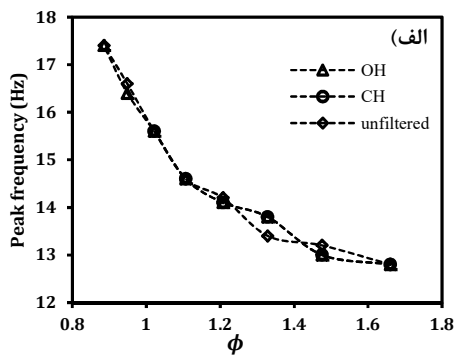


شکل ۵- تغییرات OH^*/CH^* بر حسب (الف) دبی جرمی جریان در $\phi = 1.2$ و (ب) نسبت هم‌ارزی در $\dot{m}_f = 10 \text{ mg/s}$

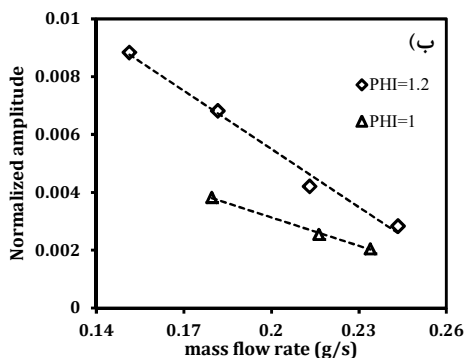
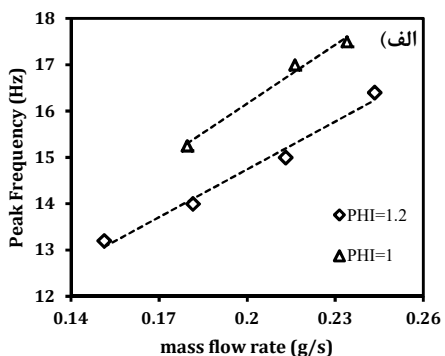
شکل ۶ سیگنال فیلترشده OH^* ، CH^* و بدون فیلتر شعله پیش‌آمیخته را در حوزه زمان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود سیگنال شعله پیش-آمیخته دارای رفتار تصادفی حول یک مقدار ثابت است. مقدار متوسط سیگنال OH^* ، CH^* و بدون فیلتر به ترتیب ۰/۳۹، ۰/۴۴ و ۰/۸۵ می‌باشد که این اعداد با توجه به میزان شدت نور و همچنین بازده انتقال نوری کاملاً قابل توجیه می‌باشد چراکه سیگنال بدون فیلتر شدت نور بسیار بیشتری داشته نسبت به دو سیگنال OH^* ، CH^* داشته و مقدار بازدهی انتقال نوری سیگنال CH^* از OH^* بسیار بیشتر است. از سیگنال حوزه زمان نمی‌توان به راحتی رفتار نوسانی شعله را بررسی کرد. شکل ۷ فضای فرکانس سیگنال‌های حوزه زمان شکل ۶ را نشان می‌دهد. در این نمودار، دامنه سیگنال نسبت به مقدار بیشینه خود یعنی مقدار دامنه در فرکانس صفر نرمال شده است. در این شکل از هر سه سیگنال رفتار نوسانی مشاهده می‌شود که برای تمامی شرایط یک فرکانس ماکزیمم غالب و همچنین یک فرکانس هارمونیک ضعیف‌تر وجود دارد که مقادیر آنها برای هر سه سیگنال تقریباً برابر است.

مکانیسم این حرکت نوسانی ناشی از گردابه‌های کلوین-هلمهولتز است. منشا این پدیده خارجی نبوده و نوسان ذاتی ناشی از احتراق آرام [۲۷، ۲۸] می‌باشد که اصطلاحاً به آن فلیکر شعله گفته می‌شود. منشا این نوسانات لایه برشی ایجاد شده بین سطح داغ شعله و محیط پیرامون و در نتیجه شتاب گرفتن نواحی داغ سطح شعله توسط نیروی شناوری است که در اثر این پدیده گردابه‌های کلوین-هلمهولتز بین سطح شعله و محیط پیرامون تشکیل می‌شوند.

در شکل‌های ۸ و ۹، مقدار فرکانس بیشینه و مقدار دامنه نرمال شده متناظر آن بر حسب نسبت هم‌ارزی و دبی جریان به ترتیب

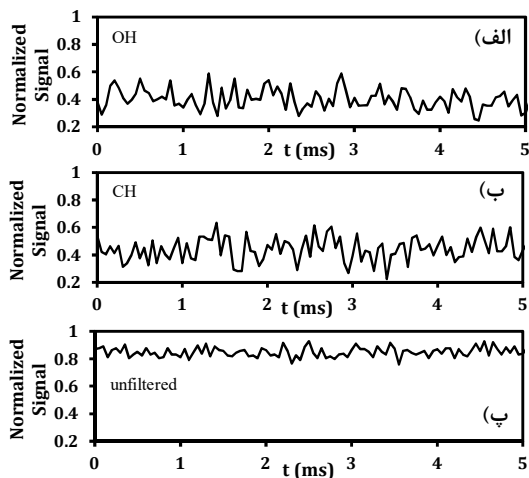


شکل ۸- تغییرات (الف) فرکانس پیک و (ب) دامنه نرمال شده بر حسب نسبت هم‌ارزی در $\dot{m}_f = 10 \text{ mg/s}$

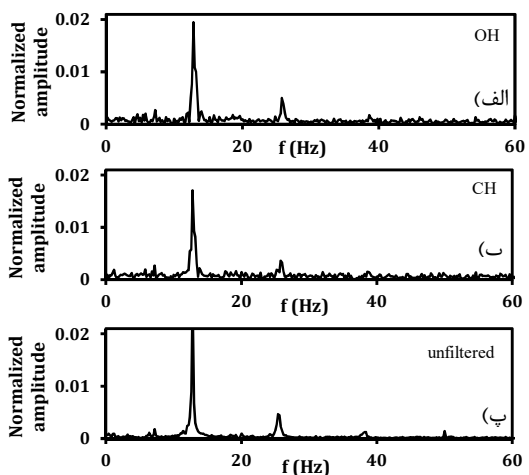


شکل ۹- تغییرات (الف) فرکانس پیک و (ب) دامنه نرمال شده بر حسب دبی جریان

داده شد که با افزایش دبی جریان در نسبت هم‌ارزی ثابت، سیگنال OH^* و CH^* نیز به صورت خطی افزایش می‌یابند. این مطلب



شکل ۶- سیگنال (الف) OH^* ، (ب) CH^* و (پ) عدم فیلتر بر حسب زمان در $\phi = 1.66$ ، $\dot{m}_f = 10 \text{ mg/s}$



شکل ۷- سیگنال (الف) OH^* ، (ب) CH^* و (پ) عدم فیلتر بر حسب فرکانس در $\phi = 1.66$ ، $\dot{m}_f = 10 \text{ mg/s}$

- [3] Gaydon AG, Wolfhard HG. Spectroscopic studies of low-pressure flames. II. Effective translational and rotational temperatures from CH bands. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1949 Oct 7;199(1056):89-104.
- [4] Higgins B, McQuay MQ, Lacas F, Rolon JC, Darabiha N, Candel S. Systematic measurements of OH chemiluminescence for fuel-lean, high-pressure, premixed, laminar flames. Fuel. 2001 Jan 1;80(1):67-74.
- [5] Akamatsu F, Wakabayashi T, Tsushima S, Katsuki M, Mizutani Y, Ikeda Y, Kawahara N, Nakajima T. The development of a light-collecting probe with high spatial resolution applicable to randomly fluctuating combustion fields. Measurement Science and Technology. 1999 Dec 1;10(12):1240.
- [6] Hardalupas YL, Orain M. Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescent emission from a flame. Combustion and Flame. 2004 Nov 1;139(3):188-207.
- [7] Hardalupas Y, Orain M, Panoutsos CS, Taylor AM, Olofsson J, Seyfried H, Richter M, Hult J, Aldén M, Hermann F, Klingmann J. Chemiluminescence sensor for local equivalence ratio of reacting mixtures of fuel and air (FLAMESEEK). Applied thermal engineering. 2004 Aug 1;24(11-12):1619-32.
- [8] Kamal M.M., Two-line (CH*/CO₂*) chemiluminescence technique for equivalence ratio mapping in turbulent stratified flames. Energy, Vol. 192, p.116485, 2020.
- [9] Yang J, Gong Y, Guo Q, Zhu H, Wang F, Yu G. Experimental studies of the effects of global equivalence ratio and CO₂ dilution level on the OH* and CH* chemiluminescence in CH₄/O₂ diffusion flames. Fuel. 2020 Oct 15;278:118307.
- [10] Liu Y, Tan J, Gao Z, Wang T, Wan M. Experimental investigation of chemiluminescence and NO_x emission characteristics in a lean premixed dual-swirl flame. Case Studies in Thermal Engineering. 2021 Dec 1;28:101653.
- [11] Swain W, Wang Y, Parajuli P, Hay M, Saylam A, Dreier T, Schulz C, Kulatilaka W. Characterization of a high-pressure flame facility using high-speed chemiluminescence and OH LIF imaging. Experiments in Fluids. 2023 Apr;64(4):71.
- [12] Zhu X, Khateeb AA, Roberts WL, Guiberti TF. Chemiluminescence signature of premixed ammonia-methane-air flames. Combustion and Flame. 2021 Sep 1;231:111508.
- [13] Sun W, Zeng W, Guo L, Zhang H, Yan Y, Lin S, Zhu G, Jiang M, Yu C, Wu F. An optical study of the combustion and flame development of ammonia-diesel dual-fuel engine based on flame chemiluminescence. Fuel. 2023 Oct 1;349:128507.
- [14] Huang Y, Yan Y, Lu G, Reed A. On-line flicker measurement of gaseous flames by image processing and spectral analysis. Measurement Science and Technology. 1999 Aug 1;10(8):726.
- [15] Huang HW. Digital camera based measurement of flame properties (Doctoral dissertation, University of Manchester).
- [16] Ghosh S, Mondal S, Mondal T, Mukhopadhyay A, Sen S. Dynamic characterization of candle flame. International Journal of Spray and Combustion Dynamics. 2010 Sep;2(3):267-84.
- [17] Thiruchengode M. Sensing and dynamics of lean blowout in a swirl dump combustor. Georgia Institute of Technology; 2006.
- [18] De S, Biswas A, Bhattacharya A, Mukhopadhyay A, Sen S. Use of flame color and chemiluminescence for early detection of lean blowout in gas turbine combustors at different levels of fuel-air premixing. Combustion Science and Technology. 2019 Apr 23.
- [19] Bedard MJ, Fuller TL, Sardeshmukh S, Anderson WE. Chemiluminescence as a diagnostic in studying combustion

نشان می‌دهد که این دو سیگنال نورشیمیایی نشانگرهای بسیار مناسبی برای آهنگ گرمای آزاد شده هستند. همچنین بررسی نتایج بیانگر این امر بودند که سیگنال OH*/CH* مستقل از مقدار دبی جریان بوده و تنها به پارامتر نسبت هم‌ارزی و سیستم نوری مورد استفاده، بستگی دارد. به این ترتیب، رابطه کالیبراسون برای بنسب برنر استخراج گردید که از آن می‌توان برای مانیتورینگ کلی و محلی شعله در شرایط پایا و ناپایا استفاده کرد.

همچنین فلیکر ذاتی شعله پیش‌آمیخته با استفاده از این روش بررسی گردید که نتایج حاصل نشان می‌دهد فرکانس غالب مستخرج از تحلیل حوزه فرکانس سیگنال‌های OH* و CH* و شرایط بدون فیلتر برای شعله پیش‌آمیخته تطابق مناسبی با هم دارند. همچنین مشاهده شد که با افزایش نسبت هم‌ارزی، فرکانس غالب شعله پیش‌آمیخته کاهش یافته و دامنه متناظر با آن افزایش می‌یابد. همچنین در نسبت هم‌ارزی ثابت با افزایش دبی جریان فرکانس غالب به صورت خطی افزایش یافته و دامنه آن کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان از روش نورشیمیایی به عنوان ابزاری کارآمد در زمینه شناسایی تجربی سیستم‌های احتراقی، کنترل و مانیتورینگ محفظه احتراق رقیق از سوخت و شناسایی پدیده‌های دینامیکی احتراق استفاده کرد.

۶- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت شرکت مهندسی و ساخت توربین مینا (توگا) و با امکانات آزمایشگاه احتراق این شرکت انجام شده است و به جهت حمایت‌های فراوانشان در انجام این تحقیق، تقدیر و تشکر می‌شود.

۷- نمادها

CH*	رادیکال برانگیخته گونه CH
OH*	رادیکال برانگیخته گونه OH
C ₂ *	رادیکال برانگیخته گونه C ₂
CO ₂ *	رادیکال برانگیخته گونه CO ₂
\dot{m}	دبی جرمی، g/s
ϕ	نسبت هم‌ارزی
ϵ	خطای اتفاقی
β	خطای سیستماتیک
δ	خطای کل
θ	زاویه پذیرش فیبر نوری (°C)

۸- مراجع

- [1] Gaydon AG, Wolfhard HG. Spectroscopic studies of low-pressure flames; temperature measurements in acetylene flames. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1948 Aug 12;194(1037):169-84.
- [2] Gaydon AG, Wolfhard HG. Spectroscopic studies of low-pressure flames IV. Measurements of light yield for C₂ bands. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1950 May 23;201(1067):570-86.

- instability in a practical combustor. *Combustion and Flame*. 2020 Mar 1;213:211-25.
- [20] Dieck RH, Steele WG, Osolobe G. Test uncertainty. *Asme Ptc*. 2005;19.
- [21] Jeong YK, Jeon CH, Chang YJ. Evaluation of the equivalence ratio of the reacting mixture using intensity ratio of chemiluminescence in laminar partially premixed CH₄-air flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2006 Jul 1;30(7):663-73.
- [22] Haber LC. An investigation into the origin, measurement and application of chemiluminescent light emissions from premixed flames (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [23] Bulewicz EM, Padley PJ, Smith RE. Spectroscopic studies of C₂, CH and OH radicals in low pressure acetylene+ oxygen flames. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1970 Feb 3;315(1520):129-47.
- [24] Guyot D, Guethe F, Schuermans B, Lacarelle A, Paschereit CO. CH*/OH* chemiluminescence response of an atmospheric premixed flame under varying operating conditions. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air 2010 Oct 10 (Vol. 43970, pp. 933-944)*.
- [25] Kojima J, Ikeda Y, Nakajima T. Basic aspects of OH (A), CH (A), and C₂ (d) chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames. *Combustion and flame*. 2005 Jan 1;140(1-2):34-45.
- [26] Ikeda Y, Kurahashi T, Kawahara N, Tomita E. Temperature measurements of laminar propane/air premixed flame using detailed oh* spectra intensity ratio. In *12th International Symposium, Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics 2004 Jul*.
- [27] Durox D, Yuan T, Villermaux E. The effect of buoyancy on flickering in diffusion flames. *Combustion science and technology*. 1997 Mar 1;124(1-6):277-94.
- [28] Shepherd IG, Cheng RK, Day MS. The dynamics of flame flicker in conical premixed flames: an experimental and numerical study. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. 2005.