



بررسی نقشه عملکردی مشعل شعله سطحی با استفاده از نورتابی شیمیایی و تحلیل تصاویر

ضیاءالحق احمدی، محمد ضابطیان طرقي*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹

کلمات کلیدی:

مشعل استوانه‌ای
نسبت هم‌ارزی
نقشه عملکردی مشعل
نورتابی شیمیایی
تحلیل تصاویر

خلاصه: در پژوهش حاضر، مشعل استوانه‌ای شعله سطحی کاملاً پیش‌آمیخته، در شش توان ۱۱/۷۴ کیلووات تا ۱۷/۱۴ کیلووات و نسبت هم‌ارزی ۰/۴ تا ۱/۶ (محدوده رقیق و غنی) مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. نتایج شامل دو بخش طیف‌سنجی و تحلیل تصاویر شعله است. در بخش سنسجش نورتابی شیمیایی، نسبت هم‌ارزی متناظر با بیشینه‌ی حرارت آزاد شده از مشعل استوانه‌ای سوراخ‌دار، در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ بدست آمده است. نسبت هم‌ارزی مشعل، با استفاده از منحنی برازش شده هیدروکسیل بر توان مشعل و تغییرات نسبت شدت OH^*/CH^* ، بصورت مستقل از توان مشعل تخمین زده شده است. در بخش تحلیل تصاویر، رنگ شعله از نسبت هم‌ارزی ۰/۴۴ تا ۱/۶ از ناحیه حد پایین به حد بالا در چهار ناحیه فیروزه‌ای، زرد و قرمز، آبی پایدار، برخاستگی و در نهایت خاموشی شعله در شش توان مشعل بررسی شده است. ناحیه عملکرد مناسب مشعل، دارای شعله به رنگ آبی بدون برخاستگی و برگشت شعله در یک محدوده‌ی مشخص بر حسب توان ورودی ارائه شده است. نقشه عملکرد، به ازای هر توان ورودی، نسبت هم‌ارزی مناسب عملکرد مشعل شعله سطحی را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

جریان‌های ورودی و غلظت گونه‌های خاص در گازهای خروجی در دسترس هستند [۱]. این اندازه‌گیری‌ها با محدودیت مشاهده لحظه‌ای مواجه هستند. برای تشخیص دقیق شعله اطلاعات کافی مورد نیاز است. تحلیل نور تابیده یا جذب شده توسط شعله، یکی از این ابزارها است. در این مورد آزمایش‌های فراوانی انجام گرفته تا دانش احتراق بهبود یابد. یکی دیگر از روش‌های تحلیل و پایش شعله، تحلیل تصویر^۱ است. در این روش با استفاده از تحلیل پیکسل رنگ‌های قرمز، سبز و آبی^۲ می‌توان مشخصه‌های شعله از جمله پیش‌آمیخته بودن و یا غیر پیش‌آمیخته بودن را مورد بررسی قرار داد [۳]. اصلی‌ترین دلیل ارائه و استفاده از روش تحلیل نور تابیده و یا جذب شده در اوایل دهه ۹۰ میلادی هزینه کم و در دسترس بودن تجهیزات، برای تحلیل طیف تابش احتراق بوده است. سامانیکو و همکاران [۴] اوایل دهه ۹۰ میلادی به بررسی تابش CO_2^* در شعله‌های مغشوش و آرام به صورت عددی پرداختند. یک رابطه بین CO_2^* و اتم H بدست آوردند. آن‌ها افزایش نورتابی CO_2^* را نشان‌دهنده‌ی دبی سوخت بیشتر و نشانه تولید

کمیت‌های که در احتراق هدف روش‌های تشخیصی قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از غلظت گونه‌ها، میدان سرعت در جریان‌های احتراقی و دما که با توجه به ارزیابی احتراقی آن، روش اندازه‌گیری اهمیت پیدا می‌کند. در احتراق، روش‌های تشخیصی به دو روش اصلی تقسیم می‌شوند. روش اول بر اساس حسگرهای مکانیکی اندازه‌گیری هستند. روش دوم حسگرهایی هستند که بدون تماس مکانیکی استفاده می‌گردد. در مورد انتخاب هر روش باید جداسازی زمان و مکان، و میزان تحمل شرایط سخت را مد نظر گرفت [۱]. پژوهش‌های انجام گرفته در رابطه با اندازه‌گیری در سال‌های اخیر برای رسیدن به سطح بازده بالاتر، کاهش آلاینده‌های احتراقی و مصرف سوخت معطوف شده است. این مطالعات به خوبی چالش‌های موجود در صنعت را که عبارت‌اند از افزایش بازده، قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری بهبود بخشید (استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر و کاهش اثرات زیست محیطی) [۲]. ابزارهای گوناگونی برای اندازه‌گیری متغیرهای مختلف مانند نرخ

1 Image Processing
2 Red, Green, Blue (RGB)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Zabetian@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر 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.



محدوده مناسب کارکرد مشعل استوانه‌ای شعله سطحی مورد استفاده در دیگ‌های چگالشی است. پارامترهای عملکردی شامل نسبت هم‌ارزی، حرارت آزاد شده، پایداری، برخاستگی و خاموشی شعله بررسی می‌شود. در نهایت محدوده‌ی عملکردی معرفی می‌شود.

۲- بستر آزمون

طرحواره بستر آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. از یک دمنده هوا با توان ۰/۷۵ کیلووات با دور موتور ۲۸۳۰ جهت تغذیه‌ی خط هوا با قطر ۰/۵ اینچ استفاده شده است. هوا پس از عبور از یک شیر کنترلی^۲ و رگلاتور وارد دی‌سنج هوا از نوع روتامتر^۳ می‌شود. دی‌سنج هوا دارای دقت ۲ درصد مقیاس کلی و در محدوده ۰/۵ تا ۴۵ مترمکعب بر ساعت است. دماسنج‌های دو فلزی با دقت ۱ درصد با محدوده اندازه‌گیری صفر تا ۱۰۰ درجه سلسیوس استفاده شده است. در نهایت هوا وارد مخلوط کننده^۴ می‌شود.

گاز طبیعی بعد از عبور از شیر تویی و کنترلی برای بهبود کیفیت، از فیلتر عبور و ذرات معلق آن گرفته می‌شود. سوخت ورودی سپس وارد رگلاتور می‌شود. رگلاتور برای گرفتن نوسانات خط ورودی و ثابت کردن فشار سوخت تعبیه شده است. ورودی آن در محدوده‌ی ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌بار است. روتامتر، با دقت ۲ درصد مقیاس کلی در محدوده‌ی اندازه‌گیری سوخت ۰/۳ تا ۳ مترمکعب تعبیه شده است. فشارسنج‌های عقربه‌ای استفاده در بستر آزمون دقت ۱ میلی‌بار دارند. محدوده اندازه‌گیری فشارسنج‌های موجود از صفر تا ۴۰ میلی‌بار است. مشعل استفاده شده دارای توان نامی ۲۸ کیلووات و از نوع استوانه‌ای با طول ۹۰ میلی‌متر و قطر ۷۰ میلی‌متر است. مشعل سطحی دارای تعداد زیادی سوراخ‌های کوچک با قطر ۰/۵ میلی‌متر و شکاف‌های مستطیلی به ابعاد ۰/۵×۴ میلی‌متر است. جنس مشعل از فولاد ضد زنگ است. رژیم‌های احتراقی مشعل سطحی شامل، شعله فیروزه‌ای، زرد و قرمز، آبی و برخاستگی شعله است. در ادامه به رژیم‌های احتراقی پرداخته شده است.

طرحواره محفظه احتراق، دوربین^۵ و طیف‌سنجی در شکل ۲، نشان داده شده است. محفظه احتراق برای ایجاد شعله کاملاً پیش آمیخته طراحی و ساخته شده است. از مزیت‌های این محفظه می‌توان به نصب انواع مختلف مشعل سطحی و بررسی آنها اشاره کرد. پنجره‌ای از جنس کوارتز با مقدار عبور دهی نور ۹۰ درصد برای دسترسی ابزارهای نوری در محفظه احتراق

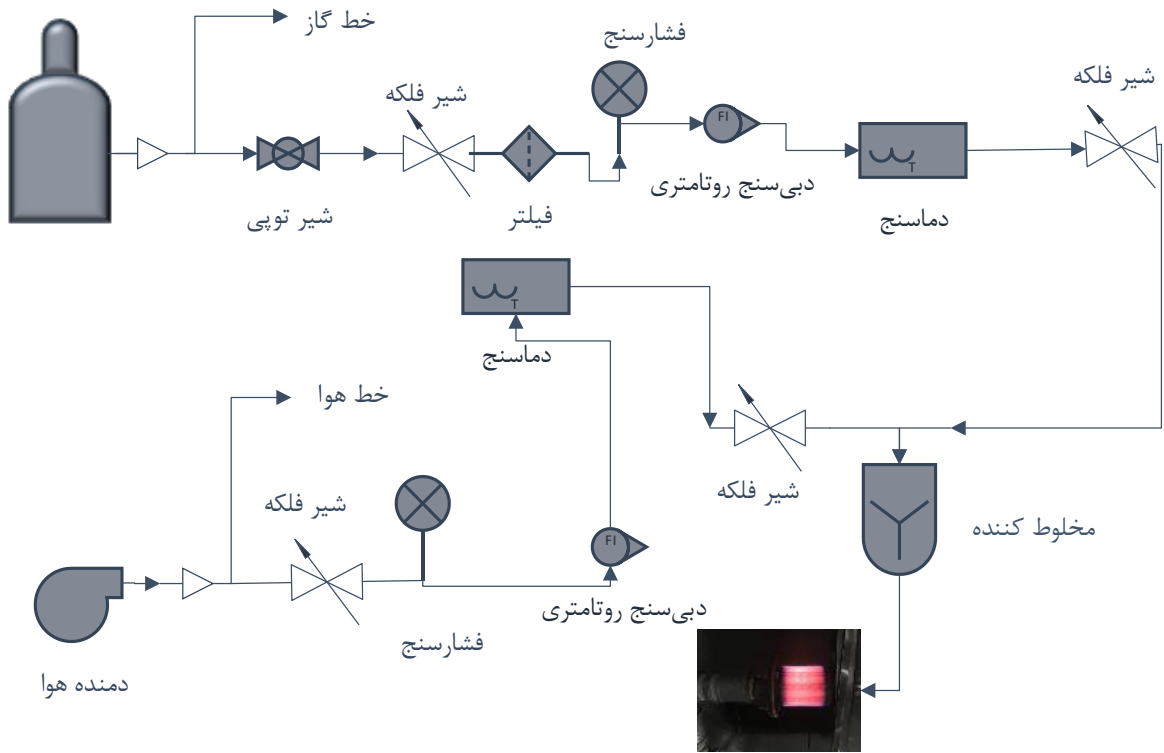
حرارت آزاد شده معرفی کردند. کوجیما و ناکاجیما [۵] در سال ۲۰۰۰ میلادی به بررسی و تحقیق گونه‌های نورتاب مهم C_p^* , CH^* , OH^* در شعله پیش آمیخته مخلوط متان و هوا در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۹ الی ۱/۵ پرداختند. آن‌ها رابطه‌ای بین OH^* / CH^* و C_p^* / OH^* با نسبت‌های هم‌ارزی به دست آوردند. هاردالوپاس و همکاران [۶] تابش رادیکال طیف پیوسته CO_2^* را مبنایی برای حرارت آزاد شده معرفی کردند. پانتواس و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۰ میلادی نورتابی شیمیایی گونه‌های برانگیخته C_p^* , CH^* , OH^* را در مخلوط پروپان و سوخت‌های دیگر (اتانول و متانول) برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، با کاهش نسبت هم‌ارزی، نسبت OH^* / CH^* نیز کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر نیز مطالعات بر روی نسبت رادیکال‌های احتراقی بیشتر شده است. جزاهو و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ میلادی مشعل‌های شامل جریان بخار و هوا را طیف‌سنجی کردند. آن‌ها دریافتند، با افزایش بخار CO_2^* کاهش می‌یابد. مطالعات اندکی در رابطه به تحلیل تصاویر وجود دارد. هوانگ و ژانگ [۳] در سال ۲۰۰۸ میلادی با استفاده از تحلیل رنگ، پیش‌آمیخته بودن شعله را تشخیص دادند. یک تصویر ساده یک دوربین معمولی را بررسی کردند. شدت پیکسل‌های قرمز، سبز و آبی در یک نمودار سه بعدی معروف به مکعب قرمز، سبز و آبی^۱ نوع شعله‌های پیش‌آمیخته و غیر پیش‌آمیخته متان را نشان می‌دهد. نجار نیکو و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۹ یک مشعل سطحی با حداکثر ظرفیت ۳۰ کیلووات را مورد بررسی قرار دادند. از دو روش تحلیل مستقیم تصاویر شعله و مشاهدات در حین آزمایش برای بررسی شعله استفاده کردند. با استفاده از این روش محدوده پایداری شعله را در نسبت هم‌ارزی ۰/۷ تا ۰/۷۳ مشخص کردند.

در سال‌های اخیر مشعل‌های شعله سطحی با ویژگی تولید آلاینده کم و حرارت زیاد، مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. سلطانیان و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۹ میلادی با استفاده از نورتابی شیمیایی، حالت بهینه عملکردی مشعل شعله سطحی را از نظر حرارت آزاد شده، بررسی و گزارش کردند. فنگو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۰ میلادی به صورت تجربی، دو نوع از مشعل شعله سطحی را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها دریافتند، زمانی که هوای خروجی در محدوده ۱/۱۵ تا ۱/۴، و توان مشعل ۲۴ کیلووات است، انتشار مونواکسید کربن در مشعل سطحی از جنس فولاد ضد زنگ بالاتر از مشعل فیبر فلزی است.

هدف از پژوهش حاضر ارائه رهیافتی برای شناسایی عملکرد و انتخاب

- 2 Blower
- 3 Gate valve
- 4 Rotameter
- 5 Mixer
- 6 Charged coupled device

1 RGB



شکل ۱. طرحواره بستر آزمون

Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus

جدول ۱. مشخصات طیفسنج استفاده شده در بستر آزمون

Table 1. Measurement parameters of the spectrometer

مشخصات	مقدار (محدوده)
شرکت سازنده	فن آوران فیزیک نور
محدوده طول موج	۲۰۰ الی ۱۲۰۰ نانومتر
وضوح	۱/۸ نانومتر
زمان نوردهی	۱۰ میکروثانیه الی ۶۰ ثانیه
قطر فیبر نوری	۱۵۰۰ میکرومتر
بیشینه دمای عملکرد	۰ الی ۵۰ درجه سلسیوس

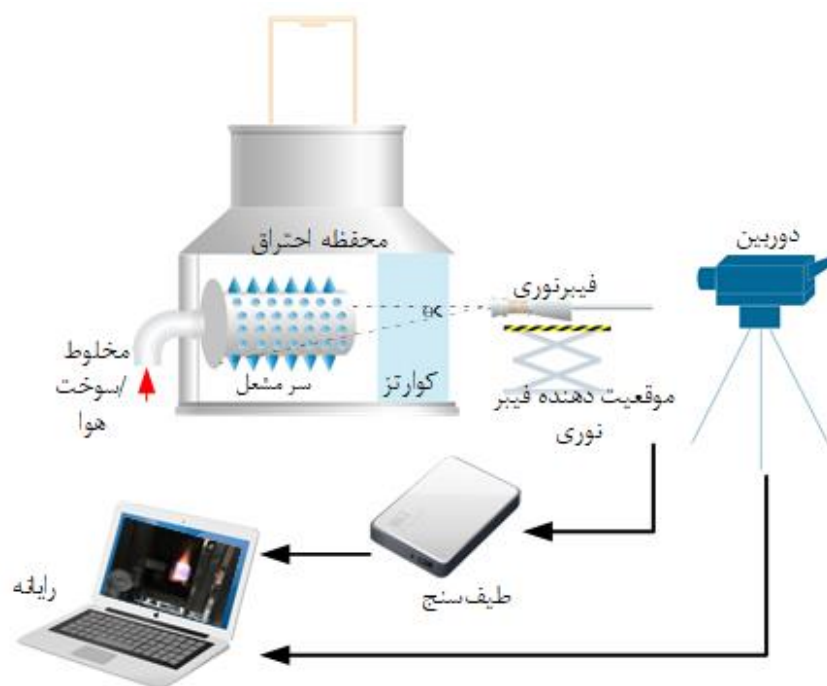
می‌گردد. فیبر نوری برای دریافت کل شعله در فاصله ۳۰ سانتیمتری مشعل قرار گرفته است. مشخصات طیفسنج و دوربین به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

(موازی با محور سرمشعل) استفاده شده است. فیبر نوری و دوربین، عمود بر محور مشعل، بر روی پایه نگهدارنده قرار داده شده است. نور توسط فیبر نوری دریافت و وارد طیفسنج می‌شود. پس از تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال به صورت نمودار شدت بر حسب طول موج برای بررسی ضبط

جدول ۲. مشخصات دوربین استفاده شده در بستر آزمون

Table 2. Measurement parameters of the CCD camera

داهوا	شرکت سازنده
کاموس	نوع حسگر
۲۶۸۸*۱۵۲۰	بیشینه حد تفکیک (پیکسل در پیکسل)
۲۵	نرخ تصویر برداری در حد تفکیک بالا
سیم لن	رابط



شکل ۲. طرحواره محفظه احتراق، دوربین و طیف سنجی

Fig. 2. Schematic of the combustion chamber, CCD camera and spectrometer

غنی به رقیق هستند. برای بدست آوردن نسبت‌های هم‌ارزی مختلف، دبی سوخت (توان مشعل)، ثابت و با تغییر دادن دبی هوا، نسبت هم‌ارزی تغییر و مورد بررسی قرار گرفته است. بستر آزمون موجود دارای محدودیت است. نسبت‌های هم‌ارزی در تمامی آزمایش‌ها بین مقادیر ۰/۴۴ و ۱/۶ است. دبی گاز بین مقادیر حداقل و حداکثر ۱/۱ تا ۱/۶ مترمکعب بر ساعت و دبی هوا بین حداقل ۹ مترمکعب بر ساعت و حداکثر ۳۵ متر مکعب در تمامی آزمون‌ها محدود شده است.

۲-۱- طراحی آزمایش و روش تحلیل داده

در این پژوهش از گاز طبیعی و هوا استفاده شده است. ترکیبات آن در جدول ۳، آورده شده است. ترکیبات گاز توسط شرکت گاز تهران، در شهریور ماه سال ۱۳۹۸ اعلام گردیده است. محدوده‌ای از توان‌های مختلف مشعل و نسبت هم‌ارزی جهت پوشش دادن رژیم‌های مختلف احتراقی در نظر گرفته شده است. این محدوده بین حد خاموشی پایین و برخاستگی شعله انتخاب شده است. حالت‌های مختلف مشعل استوانه‌ای شامل، شعله فیروزه‌ای، زرد و قرمز، آبی پایدار و برخاستگی شعله است. این حالت‌ها از

جدول ۳. ترکیبات و شرایط فیزیکی گاز طبیعی

Table 3. Composition and physical properties of natural gas

واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	جزء	جزء
مول درصد	۸۹/۱۱	۹۲/۳	۹۰/۷	CH _۴	متان
مول درصد	۱/۷۴	۳/۸۲	۲/۸	C _۲ H _۶	اتان
مول درصد	۰/۱۹	۱/۲۱	۰/۷	C _۳ H _۸	پروپان
مول درصد	۳/۵۶	۴/۹۵	۴/۳	N _۲	نیتروژن
مول درصد	۰/۳۹	۱/۲۹	۰/۸۴	CO _۲	دی اکسید کربن
مول درصد	۰/۵۳	۰/۷۹	۰/۶۶	جزء	دیگر
مگاژول بر کیلوگرم	۳۵/۸	۴۱/۰	۳۸/۴	CH _۴	ارزش حرارت کل

دمای استاندارد طراحی برای روتامتر سوخت و هوا برابر ۲۰ درجه سلسیوس و فشارنسبی طراحی برای روتامتر سوخت و هوا به ترتیب برابر ۱۸ میلی بار و ۴۰ میلی بار است. بنابراین مقدار دبی واقعی Q_c از رابطه (۱) بدست می آید. پژوهش‌های مشابه [۹ و ۱۱]، روی یک مشعل که بخشی از آن پیش‌آمیخته و بخشی از آن نفوذی بوده، اجرا شده است. در حالی که با ساخت محفظه احتراق، یک مشعل کاملاً پیش‌آمیخته در دسترس است. در کار فعلی همه آزمایش‌ها بر روی شعله‌های کاملاً پیش‌آمیخته اجرا شده است. تغییرات رادیکال هیدروکسل نرمال شده، و یک رابطه همبستگی برای آن استخراج شده است. در این تحقیق برای دقیق‌تر شدن بررسی نسبت شدت OH^*/CH^* ، نور پس‌زمینه رادیکال CO_2^* حذف شده است.

رادیکال CO_2^* در محدوده‌ی طول موج ۳۵۰ تا ۶۰۰ نانومتر تابش می‌کند [۱۴]. رادیکال‌های CH^* و C^* به ترتیب در طول موج ۴۳۱ و ۴۷۱ نانومتر قرار دارند. برای به دست آوردن شدت تابش رادیکال CH^* بیشینه تابش در طول موج مشخص است. از تفاضل مقدار شدتی که بیشینه شروع شده، از مقدار کل بیشینه، شدت پس‌زمینه CO_2^* حذف شده است.

انجام آزمایش‌ها در حضور نورهای مزاحم و تابش حرارتی مشعل شعله سطحی، یکی از چالش‌های طیف‌سنجی تابشی است. برای حذف نورهای اطراف، آزمون‌ها در ساعت‌های پایانی روز گرفته شده است. برای حذف تابش حرارتی سطح سر مشعل، در هر ظرفیت حرارتی مشعل، شعله به صورت ناگهانی خاموش و طیف حرارتی سر مشعل ضبط گردیده است. با تفاضل طیف حرارتی از طیفی که با وجود شعله گرفته شده، شدت خالص بر

برای محاسبه عدم قطعیت نسبت هم‌ارزی از رابطه کلاین و مک کلینتوک^۱ استفاده شده است [۱۳]. این روش با استفاده از مشتق‌گیری جزئی از کمیت مورد نظر با توجه به داده‌های ورودی انجام می‌گردد. در این پژوهش داده‌ها شامل دمای محیط، دمای مخلوط گاز و هوا، دبی گاز و هوا، تصویر شعله، طیف شعله، دمای خط گاز و دمای خط هوا با استفاده از تجهیزات مختلف اندازه‌گیری برداشته می‌شوند. دماهای گاز و هوا و مخلوط آنها توسط دماسنج‌های عقربه‌ای دو فلزی موجود (شکل ۱) در بستر آزمون خوانده می‌شود. به علت عقربه‌ای بودن دماسنج‌ها، باید زمان کافی برای پایدار شدن آن داده شود (۳۰ ثانیه). دبی گاز و هوا از روی روتامتر به صورت چشمی خوانده و در یک فایل ثبت می‌گردد. دبی‌های خوانده شده با توجه به شرایط دمایی و فشار طراحی روی روتامتر نشان داده می‌شود. دما و فشار کاری با مقدار طراحی روی روتامتر متفاوت است. می‌توان مقدار دبی در حالت واقعی را با استفاده از رابطه (۱) بدست آورد.

$$\frac{P_r Q_r}{T_r} = \frac{P_c Q_c}{T_c} \quad (1)$$

که در آن Q_r دبی سیال (روتامتر شکل ۱ نشان می‌دهد) در دمای T_r و فشار P_r (فشارسنج و دماسنج خط هوا و گاز شکل ۱ نشان می‌دهد) است. مقادیر T_c و P_c دما و فشار استاندارد طراحی روی روتامترها است.

1 Kline and McClintock

حسب طول موج بدست می‌آید. زمان نوردهی به فیبر نوری ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه و به منظور هموار سازی داده‌ها متوسط طول موج، ۳۰ نانومتر قرار داده شده است.

با توجه به عملکرد فشارسنج‌ها و دماسنج‌های موجود در دستگاه و همچنین رواتر خط گاز، می‌توان از گزارش عدم قطعیت در داده‌های گزارش شده صرف‌نظر کرد. رواتر خط هوا دارای نوساناتی در محدوده‌ی کاری خود است. توان حرارتی مشعل متناسب با دبی سوخت است، می‌توان از عدم قطعیت توان مشعل نیز صرف‌نظر کرد. با توجه به تأثیر دبی هوا در نسبت هم‌ارزی، مشخص است که برای این کمیت باید عدم قطعیت را در نظر گرفت. به طور کلی عدم قطعیت به شکل رابطه‌ی (۲) است. در آن R مقدار گزارش شده، M مقدار میانگین داده‌ها در تعداد خوانده شده و σ انحراف استاندارد در همین تعداد داده می‌باشد.

$$R = M \pm \sigma \quad (2)$$

برای تعیین میزان عدم قطعیت شدت تابش از سرمشعل، داده‌های شدت را برای ۱۰ ثانیه با استفاده از طیف‌سنج و در گام‌های زمانی ۱ ثانیه ثبت کرده و از روی آن، میزان تغییرات عدم قطعیت محاسبه می‌شود. همین روند برای دبی هوا نیز در ۱۰ مرتبه خواندن رواتر خط هوا انجام شد. عدم قطعیت آن را به صورت درصدی از مقدار اصلی برابر ۰.۵٪ گزارش شده است.

با توجه به محدودیت‌های غیر قابل کنترل، مانند شرایط محیطی و عوامل دیگر، داده‌ها از روی میانگین‌گیری هر مقدار و به ازای هر سه بار تکرار آزمایش گزارش شده است. با گزارش میانگین داده‌های آزمایش، می‌توان گزارش را تکرارپذیر نامید. به طور مشخص میزان تکرارپذیری برای فشارسنج‌ها، دماسنج‌ها و همچنین رواتر دبی گاز که تغییرات آن‌ها در دقت ابزار مورد نظر قابل تشخیص نیست، در نظر گرفته نمی‌شود.

۳- ارائه نتایج و بحث

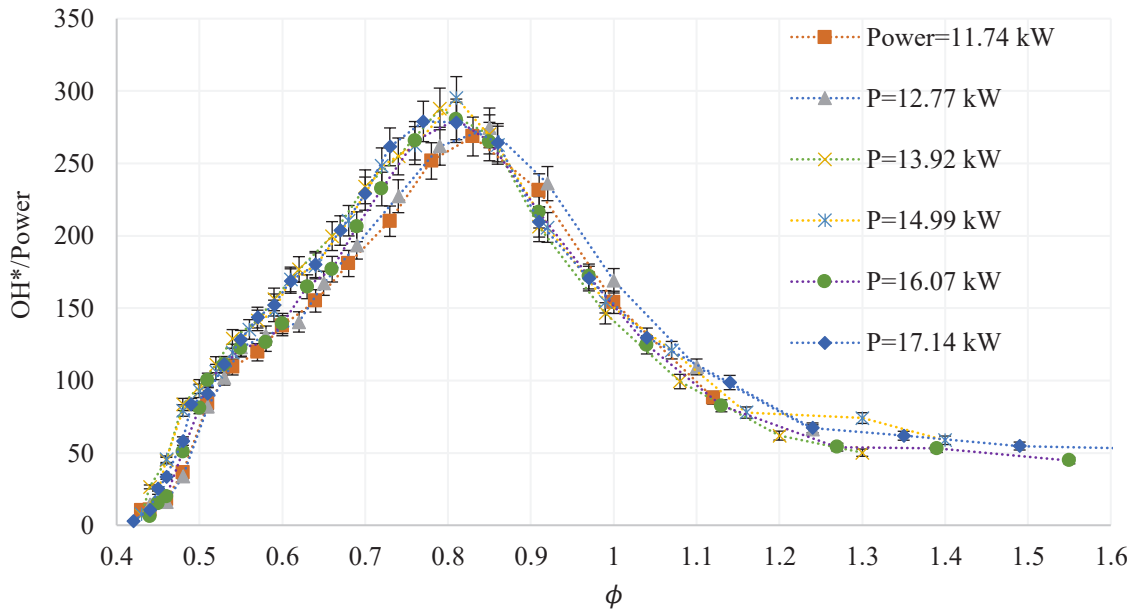
در این پژوهش طیف طبیعی شعله و تصاویر شعله به عنوان ابزاری برای تشخیص پارامترهای عملکردی مشعل مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترها شامل حرارت آزاد شده، نسبت هم‌ارزی، برخاستگی شعله، پایداری و خاموشی شعله است.

در ادبیات موضوع شدت تابش رادیکال هیدروکسیل به علت فعال کردن زنجیره واکنش‌های دما بالا، نشان دهنده‌ی حرارت آزاد شده است [۶ و ۱۱]

و [۱۵]. شکل ۳، روند تغییرات نرمال شده تابش گونه نورتاب OH^* بر توان مشعل، بر حسب نسبت هم‌ارزی‌های مختلف را نشان می‌دهد. این شکل مستقل از توان بوده و وضعیت شدت تابش (حرارت آزاد شده) در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف را نشان می‌دهد. بطور مثال حرارت آزاد شده در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ به نسبت هم‌ارزی ۱، دو برابر است. در این شکل می‌توان یک چند جمله‌ای برازش کرد (شکل ۴).

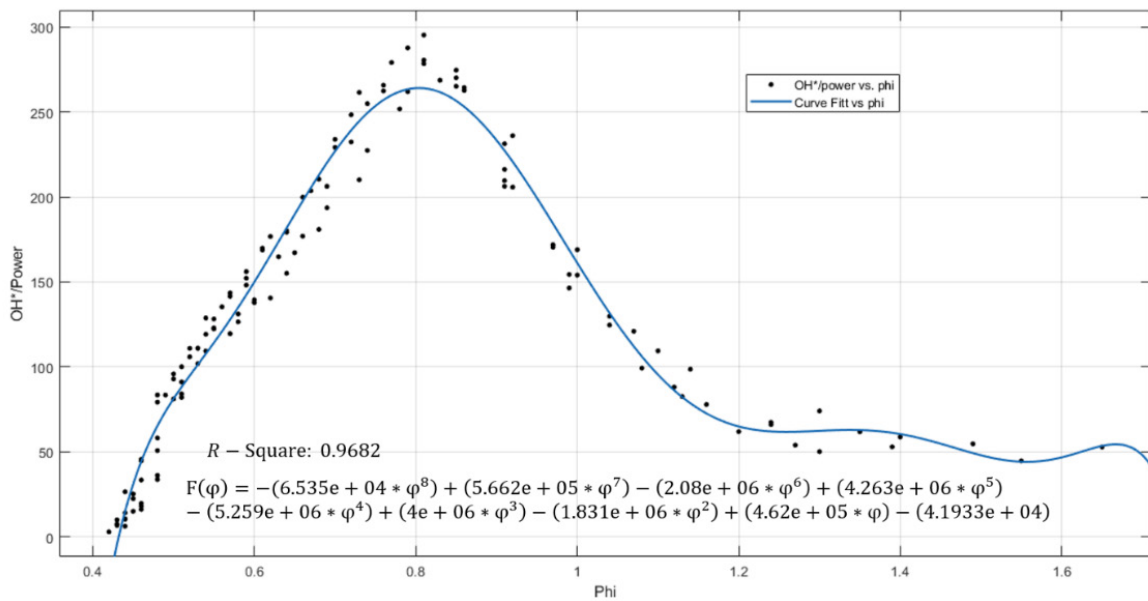
شکل ۴، منحنی برازش شده $OH^* / Power$ بر حسب نسبت هم‌ارزی، بصورت یک چند جمله‌ای، در توان‌های مختلف مشعل را نشان می‌دهد. بیشینه نسبت شدت در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ حاکی، از بالاتر بودن نرخ حرارت آزاد شده از شعله است. با افزایش نسبت هم‌ارزی (سوخت بیشتر) نرخ واکنش‌های احتراقی افزایش پیدا کرده است. در نتیجه این منحنی افزایش می‌یابد. با افزایش سوخت در محدوده نسبت هم‌ارزی بیشتر از ۰/۸۵، نرخ واکنش‌های احتراقی کاهش یافته و روند منحنی، کاهشی می‌شود. با استفاده از منحنی برازش شده، می‌توان نسبت هم‌ارزی مناسب را نیز به دست آورد. شکل ۴ به علت وجود توان مشعل محدود به دانستن دبی سوخت است. از نظر فیزیکی، بیشینه شدن نسبت شدت هیدروکسیل در نسبت هم‌ارزی ۰/۸، نشان دهنده‌ی برهمکنش سطح و شعله، در این نوع مشعل‌ها است. در این نسبت هم‌ارزی، سطح داغ شده‌ی سر مشعل (توسط شعله)، مخلوط سوخت و هوا را پیش‌گرم می‌کند. در نتیجه بیشینه نسبت شدت در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ رخ می‌دهد.

بخش آخر نورتابی شیمیایی مربوط به نسبت OH^* / CH^* به عنوان یک روش سنجش نسبت هم‌ارزی در مشعل کاملاً پیش‌آمیخته است. شکل ۵، این نسبت بر حسب نسبت هم‌ارزی در توان‌های مختلف مشعل شعله سطحی را نشان می‌دهد (بدون تابش پس‌زمینه رادیکال دی اکسید کربن). با استفاده از نسبت شدت OH^* / CH^* ، مستقل از توان مشعل، می‌توان نسبت هم‌ارزی مشعل را به کمک دریافت تابش طبیعی شعله، در محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی ۰/۶ تا ۱/۱ به دست آورد. مزیت این شکل عدم وابستگی آن به دبی ورودی (بر خلاف شکل ۴) و مستقل از توان، است. در ناحیه نسبت هم‌ارزی یک و غنی‌تر از یک به علت کاهش نسبی اکسیدکننده و به تبع آن کاهش نرخ واکنش، تغییرات نسبت OH^* / CH^* کاهش می‌یابد. در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از ۰/۶، با افزایش هوا، برخاستگی شعله^۱ شعله رخ می‌دهد. برخاستگی شعله باعث ناپایداری شعله می‌شود. در ادامه به ناپایداری شعله پرداخته می‌شود.



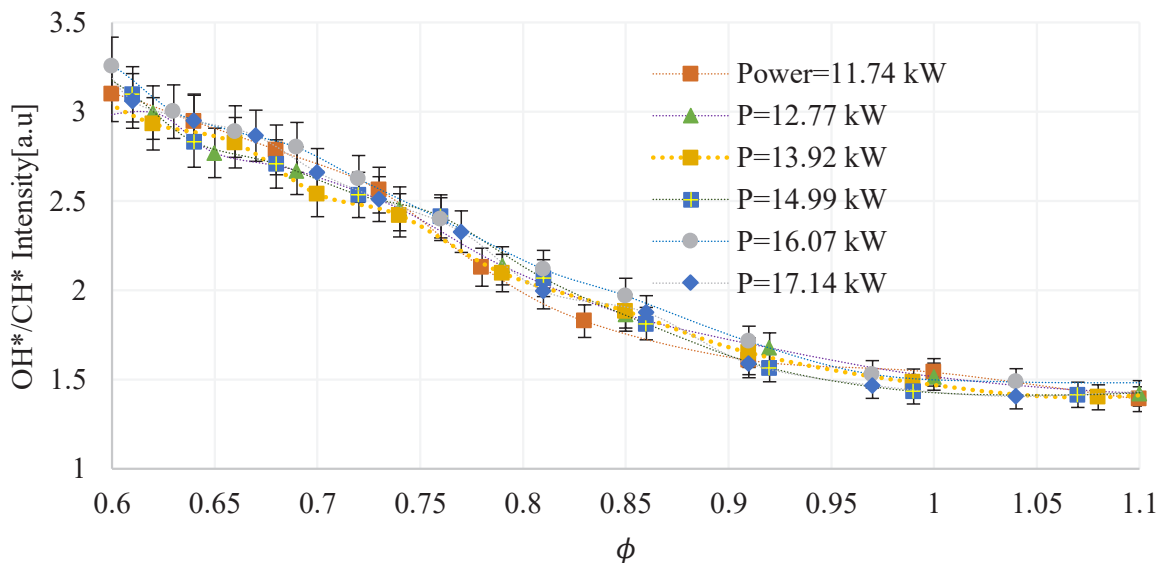
شکل ۳. روند تغییرات نرمال شده شدت تابشی گونه نورتاب OH^* بر توان مشعل در توان‌های عملیاتی مشعل بر حسب نسبت‌های هم‌ارزی

Fig. 3. OH^* normalized intensity variation for operating burner power versus equivalence ratio



شکل ۴. منحنی برازش $OH^*/Power$ بر حسب نسبت هم‌ارزی در توان‌های عملیاتی مشعل استوانه‌ای شعله سطحی

Fig. 4. $OH^*/Power$ Curve fitting intensity variation for operating burner power versus equivalence ratio



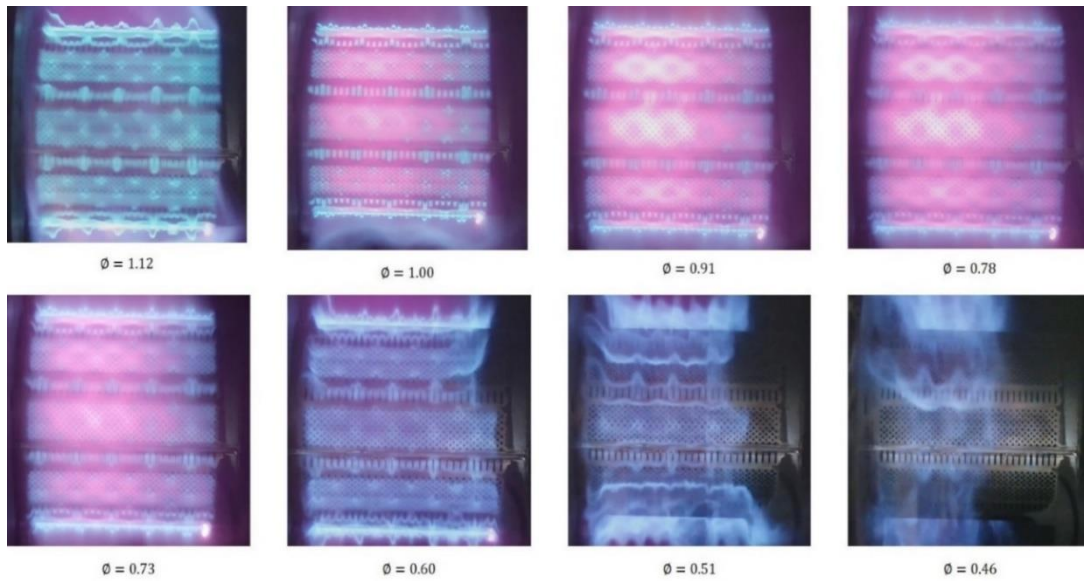
شکل ۵: نسبت OH^*/CH^* به عنوان تابعی از نسبت هم‌آزری در توان‌های عملیاتی مشعل

Fig. 5. Intensity ratio of OH^*/CH^* as a function of equivalence ratio for operating burner power

کاهش نسبت هم‌آزری و افزایش سرعت مخلوط هوا و سوخت خروجی از سر مشعل، برخاستگی به وجود می‌آید. برخاستگی شعله از نسبت هم‌آزری ۰/۶ شروع شده است. در نهایت خاموشی شعله در ۰/۴۴ رخ می‌دهد. روند کلی تغییرات شعله از توان ۱۱/۷۴ کیلووات تا ۱۷/۱۴ کیلووات، مانند توان ۱۱/۷۴ کیلووات است. تنها تفاوت چسبیدگی کمتر شعله در توان‌های بالاتر است. در ظرفیت بالاتر (شکل ۷) روند تغییر از فیروزه‌ای به آبی است. دلیل آن نیز افزایش سرعت مخلوط سوخت و هواست. با افزایش سرعت سوخت و هوا، شعله از سطح فاصله گرفته و از داغ شدن سطح سر مشعل، جلوگیری می‌کند.

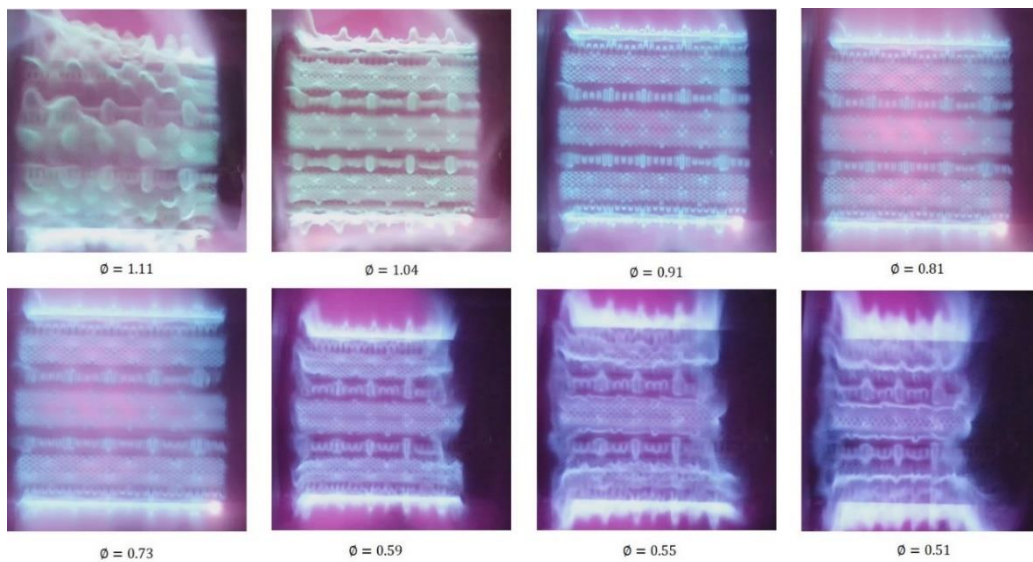
نقشه عملکرد مشعل کاملاً پیش‌آمیخته در شکل ۸ نشان داده شده است. ناحیه سبز فیروزه‌ای، در این ناحیه با توجه به اینکه مقدار سوخت زیاد و مقدار اکسیدکننده نسبتاً کم است، شعله از سطح فاصله گرفته و ناپایدار است (نسبت هم‌آزری ۱/۱۲، شکل ۶). ناحیه زرد و قرمز تشعشی، در این ناحیه شعله به سطح سر مشعل چسبیده و سطح فلز سرمشعل داغ می‌گردد (نسبت هم‌آزری ۰/۹۱، شکل ۶). ناحیه‌ی شعله‌ی آبی پایدار (نسبت هم‌آزری ۰/۷۳، شکل ۶)، این ناحیه در حد فاصل بین دو حالت شعله‌ی زرد و قرمز تشعشی (نسبت هم‌آزری ۰/۹۱، شکل ۶) و برخاستگی شعله

تصاویر شعله (شکل ۶) در توان ۱۱/۷۴ کیلووات و نسبت هم‌آزری‌های مختلف نشان داده شده است. در این پژوهش شعله پایدار، شعله آبی، فاقد برخاستگی، برگشت شعله و بین حالت زرد تشعشی و برخاستگی شعله در نظر گرفته شده است [۱۶]. شعله در حالت غنی مخلوط هوا و سوخت، (نسبت هم‌آزری ۱/۱۲) به رنگ فیروزه‌ای است. در ادبیات موضوع، رنگ فیروزه‌ای متعلق به رادیکال C_2^* است [۳]. رادیکال C_2^* در طول موج ۵۱۶ نانومتر گسیل می‌شود. این طول موج متناظر با رنگ فیروزه‌ای است. در این وضعیت مقدار سوخت زیاد و مقدار اکسیدکننده نسبتاً کم است. در نتیجه در ناحیه شعله فیروزه‌ای، شعله ناپایدار است. در تمام آزمایش‌های انجام شده، دبی سوخت ثابت نگه داشته شده است. با تغییر دبی هوا، نسبت هم‌آزری تغییر کرده است. با افزایش دبی هوا، نسبت هم‌آزری کاهش می‌یابد. کاهش نسبت هم‌آزری باعث می‌شود شعله به حالت زرد و قرمز متمایل می‌شود. در این نسبت هم‌آزری‌ها شعله به سطح سر مشعل نزدیک و باعث داغ شدن آن می‌شود. به تدریج با افزایش هوا و کاهش نسبت هم‌آزری، رنگ شعله به سمت آبی متمایل می‌شود. رادیکال CH^* یکی از عوامل اصلی بروز رنگ آبی در شعله است. این رادیکال در طول موج ۴۳۱ نانومتر که متعلق به رنگ آبی است [۳]. طبق تعریف پایداری شعله، در این ناحیه شعله پایدار است. با



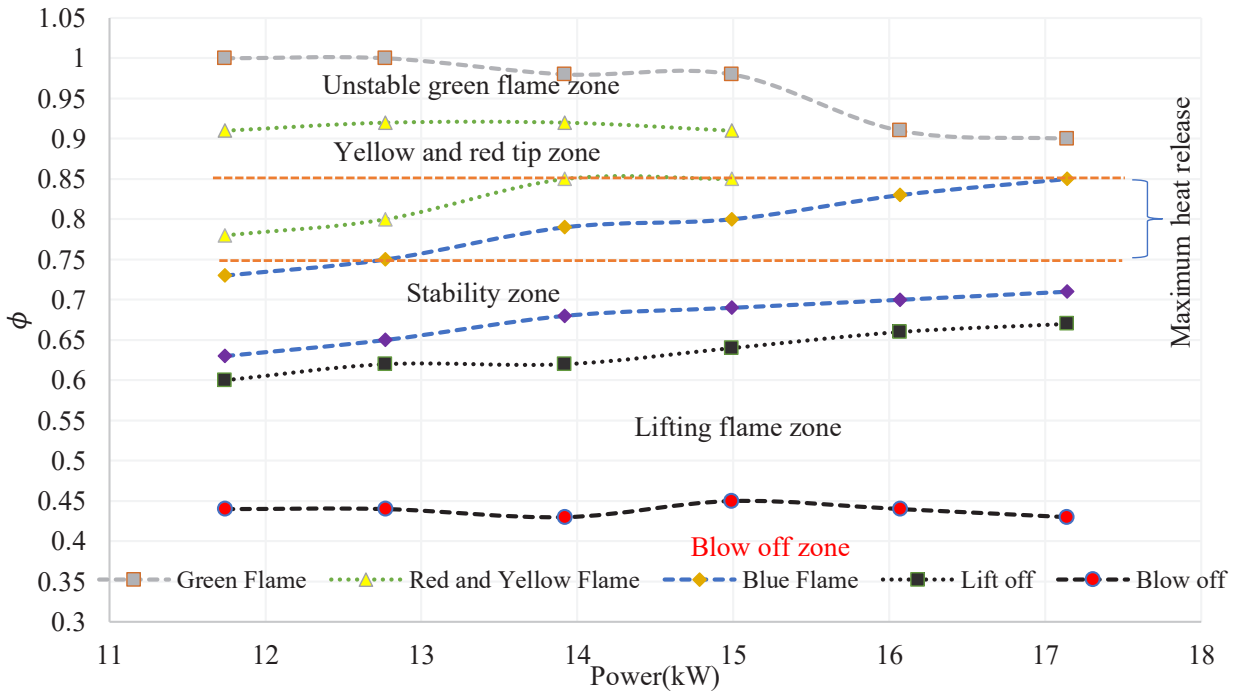
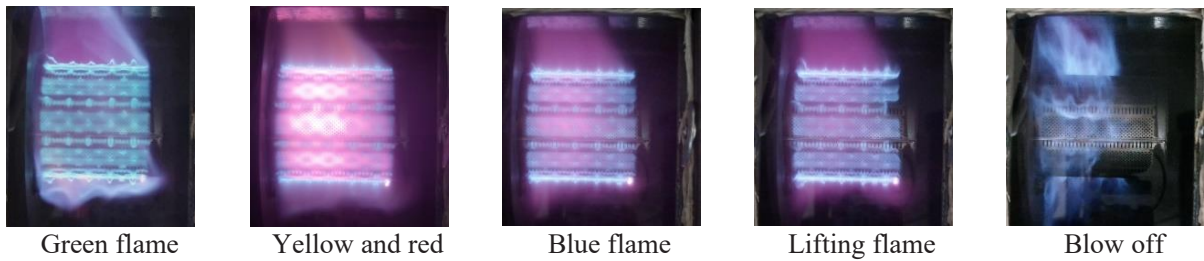
شکل ۶. تصاویر شعله مشعل در توان ۷۴/۱۱ کیلو وات در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف از حالت سمت چپ به راست، شعله فیروزه‌ای $\Phi = 1.12$ ، شعله زرد تشعشعی و فیروزه‌ای $\Phi = 1.0$ ، شعله تشعشعی $\Phi = 0.91$ ، شعله آبی $\Phi = 0.78$ ، شعله آبی $\Phi = 0.73$ ، برخاستگی شعله $\Phi = 0.60$ ، خاموشی شعله $\Phi = 0.51$ ، شعله آبی $\Phi = 0.46$ ، پرخاستگی شعله $\Phi = 0.46$ ، خاموشی شعله $\Phi = 0.46$

Fig. 6. Flame images at power 11.74 kW versus equivalence ratio left to right green flame $\Phi = 1.12$, radiant flame and green flame $\Phi = 1.0$, radiant flame $\Phi = 0.91$, stable blue flame $\Phi = 0.78, 0.73$, lift-off flame $\Phi = 0.60$, blow cut flame $\Phi = 0.46$



شکل ۷. تصاویر شعله مشعل در ۱۷/۱۴ کیلو وات در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف از حالت سمت چپ به راست، شعله فیروزه‌ای $\Phi = 1.11, 1.04, 0.91$ ، شعله آبی $\Phi = 0.81$ ، برخاستگی شعله $\Phi = 0.73$ ، خاموشی شعله $\Phi = 0.59$ ، شعله آبی $\Phi = 0.55$ ، پرخاستگی شعله $\Phi = 0.51$ ، خاموشی شعله $\Phi = 0.51$

Fig. 7. Flame images at power 17.14 kW versus equivalence ratio left to right, green flame $\Phi = 1.11, 1.04, 0.91$, blue flame $\Phi = 0.81, 0.73$, lift-off flame $\Phi = 0.59$, blow cut flame $\Phi = 0.51$



شکل ۸. نقشه عملکرد مشعل شعله سطحی کاملاً پیش آمیخته

Fig. 8. The fully premixed surface flame burner functional diagram

سطحی استوانه‌ای در ظرفیت‌های حرارتی مورد آزمایش، بین نسبت هم‌ارزی ۰/۷ تا ۰/۸۵ واقع شده است.

ناحیه‌ی برخاستگی شعله (به عنوان مثال نسبت هم‌ارزی ۰/۶ در توان ۱۱/۷۴ کیلووات)، شروع برخاستگی شعله از لبه‌های کناری در انتهای سر مشعل به علت سرعت بیشتر مخلوط سوخت و هوا در آن ناحیه در نظر گرفته شده است. حالت شعله‌ی آبی پایدار نیز در برخی از قسمت‌های سرمشعل استوانه‌ای به صورت موضعی برخاستگی رخ می‌دهد. در تحقیق حاضر این برخاستگی‌های موضعی ناچیز مشاهده شده است. با افزایش ظرفیت، شروع برخاستگی شعله از نسبت هم‌ارزی ۰/۶ به ۰/۶۷ منتقل شده است. این موضوع

(نسبت هم‌ارزی ۰/۶، شکل ۶) اتفاق می‌افتد. پایدارترین حالت یک شعله‌ی پیش‌آمیخته در این محدوده قرار می‌گیرد. در این حالت بین سرعت مخلوط نسوخته و سرعت سوزش تعادل برقرار شده است. نحوه تشخیص این ناحیه به این صورت است که، شعله نه خیلی به سطح سر مشعل چسبیده و نه خیلی از سطح فاصله گرفته و همچنین رنگ شعله آبی است. به دلیل رفع حالت شعله زرد تشعشعی با افزایش ظرفیت، ناحیه‌ی پایداری شعله وسیع‌تر می‌شود (توان ۱۴/۹۹ کیلووات و بیشتر). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مشعل مورد آزمایش در ظرفیت‌های بالا دامنه‌ی پایداری وسیع‌تری دارد. از نمودار پایداری می‌توان نتیجه گرفت که حالت شعله‌ی پایدار مشعل شعله

مورد استفاده در دیگ‌های چگالشی توانایی تخمین نسبت هم‌ارزی را بدون محدودیت به دبی سوخت و مستقل از توان دارد. در نمودار نسبت شدت OH^* / CH^* ، نور پس‌زمینه رادیکال CO_2^* به عنوان رادیکال تاثیرگذار در نتایج این پژوهش نسبت به سایر پژوهش‌های مشابه حذف شده است. آقای هاردالوپاس و ارین [۶] با استفاده از نورتابی شیمیایی و نسبت شدت، OH^* / CH^* محدوده ۰/۷ الی ۱/۳ را مناسب تخمین نسبت هم‌ارزی معرفی کردند.

- تصاویر شعله برای به دست آوردن نقشه عملکردی مشعل در توان‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نقشه عملکردی مشعل به پنج ناحیه شعله فیروزه‌ای، شعله زرد و قرمز، آبی پایدار، برخاستگی شعله و در نهایت خاموشی شعله از غنی به رقیق تقسیم بندی و محدوده آنها مشخص گردید. در کارهای مشابه شروع برخاستگی، بلندشدگی شعله در ابتدا و انتهای سر مشعل (به طور همزمان) در نظر گرفته شده با توجه به اینکه در این نوع مشعل‌ها سرعت مخلوط سوخت و هوا در انتهای سرمشعل بیشتر از ابتدای سر مشعل است، در پژوهش حاضر برخاستگی شعله (به عنوان یک ناپایداری شعله) در لحظه بلندشدگی شعله در انتهای سرمشعل در نظر گرفته شده است. با استفاده از نقشه عملکردی مشعل ناحیه مناسب عملکرد مشعل شعله سطحی در ناحیه رقیق سوز به دست آورده شده است. نقشه عملکرد مشعل پژوهش حاضر با در نظر گرفتن حرارت آزاد شده و رژیم‌های مختلف ایجاد شده توسط این نوع مشعل‌ها بدست آورده شده است. مشاهده همزمان عملکرد حرارتی شامل پایداری و بیشینه حرارت آزاد شده از مزیت نقشه عملکرد نسبت به سایر پژوهش‌های انجام شده است. در کار مشابه آقای سانگ و همکاران [۱۹] نقشه عملکرد پایدار مشعل را معرفی کردند. این نقشه فقط ناحیه پایداری شعله، برگشت شعله و خاموشی شعله را مشخص کرده است.

- دمای حداکثر آدیاباتیک شعله با توجه به تجزیه محصولات در نسبت استوکیومتریک است. در مشعل شعله سطحی مورد مطالعه این پژوهش، به علت نزدیک شدن شعله‌ها به سطح سر مشعل، مخلوط سوخت و هوا پیشگرم شده و بیشترین حرارت آزاد شده در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ اتفاق می‌افتد. از نظر عملکرد، این نوع مشعل‌ها به مشعل‌های متخلخل شباهت دارند. گردش مجدد حرارت در این نوع مشعل‌ها شامل ترکیبی از هر سه حالت انتقال گرما، هدایت، همرفت و تابش است. فرآیند را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد: پایین دست ناحیه واکنش، گاز گرم‌تر از سطح جامد مشعل است. بنابراین گرما به صورت همرفت از محصولات احتراق داغ

نیز به دلیل افزایش سرعت مخلوط نسوخته و در نتیجه بیشتر شدن آن نسبت به سرعت سوزش رخ داده است. حد خاموشی پایین شعله، در واقع کمترین نسبت هم‌ارزی که شعله‌ی پیش‌آمیخته مشتعل باقی می‌ماند، در تمام ظرفیت‌ها در حدود ۰/۴۴ است.

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، مشعل شعله سطحی مورد استفاده در دیگ‌های چگالشی، مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. مشعل مورد استفاده در شش توان ۱۱/۷۴ کیلووات تا ۱۷/۱۴ کیلووات و نسبت هم‌ارزی ۰/۴ تا ۰/۶، با استفاده از نورتابی شیمیایی و تحلیل تصاویر مورد آزمون قرار گرفته است. تمام آزمون‌ها در حالت کاملاً پیش‌آمیخته و نزدیک به شرایط واقعی این نوع مشعل‌ها انجام گرفته است. نتایج آزمون‌های انجام گرفته بصورت زیر است:

- با استفاده از نورتابی شیمیایی (رادیکال نرمال شده هیدروکسیل) می‌توان به صورت کیفی نسبت حرارت آزاد شده را بدست آورد. با استفاده از نورتابی بیشینه حرارت آزاد شده در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ اتفاق می‌افتد. آقای سلطانیان و همکاران [۱۱] محدوده‌ی ۰/۷۷ الی ۰/۸۵ را در مشعل شعله سطحی برای بیشینه حرارت آزاد شده گزارش دادند. همچنین آقایان لی و لی [۱۷] محدوده ۰/۷ الی ۰/۷۵ را ناحیه مناسب عملکرد حرارتی مشعل شعله سطحی استفاده شده در تحقیق خود گزارش کردند. نتایج نشان می‌دهد که این نوع مشعل‌ها در ناحیه رقیق عملکرد مناسب حرارتی دارند.

- با برازش یک منحنی بر تغییرات نرمال شده هیدروکسیل، می‌توان نسبت هم‌ارزی را نیز تخمین زد. مزیت این نمودار تخمین نسبت هم‌ارزی در محدوده وسیع عملکرد ۰/۴۴ الی ۱/۶۵ (رقیق و غنی سوز) مشعل است. در کارها مشابه از نسبت شدت‌ها استفاده شده، به علت نوسان زیاد و یک به یک نبودن در محدوده رقیق (کمتر از نسبت هم‌ارزی ۰/۶) و غنی (بالتر از نسبت هم‌ارزی ۱ و غنی‌تر) در محدوده مشخصی قابل استفاده است در حالیکه نمودار نرمال شده، محدوده وسیعی از عملکرد مشعل را در بر می‌گیرد. در کار مشابه، آقای دینگ و همکاران [۱۸] با تغییر اجزای سوخت، به دقت اندازه‌گیری شاخص‌های اندازه‌گیری نسبت هم‌ارزی پرداختند. رادیکال هیدروکسیل را به عنوان یک شاخص مناسب با در نظر گرفتن تغییرات در اجزای سوخت معرفی کردند.

- به علت محدود بودن منحنی برازش شده به دبی سوخت، نسبت OH^* / CH^* به عنوان شاخصی دیگر برای تخمین نسبت هم‌ارزی معرفی گردید. این نسبت شدت در محدوده کاری مشعل‌های شعله سطحی (۰/۶-۱)

and Flame, 139(3) (2004) 188-207.

- [7] H. Panoutsos, 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.
- [8] J. Li, J. Zhao, S. Guo, X. Zhou, Y. Liu, J. Bai, Y. Fang, Predicting the vanadium speciation during petroleum coke gasification by thermodynamic equilibrium calculation, *Fuel*, 176 (2016) 48-55.
- [9] M. Najarnikoo, M.Z. Targhi, H. Pasharshahri, Experimental study on the flame stability and color characterization of cylindrical premixed perforated burner of condensing boiler by image processing method, *Energy*, 189 (2019) 116130.
- [10] Y. Ding, D. Durox, N. Darabiha, T. Schuller, Chemiluminescence of Burner-Stabilized Premixed Laminar Flames, *Combustion Science and Technology*, 191(1) (2019) 18-42.
- [11] H. Soltanian, M.Z. Targhi, H. Pasharshahri, Chemiluminescence usage in finding optimum operating range of multi-hole burners, *Energy*, 180 (2019) 398-404.
- [12] F. Liu, L. Zheng, R. Zhang, Emissions and thermal efficiency for premixed burners in a condensing gas boiler, *Energy*, 202 (2020) 117449.
- [13] J.P. Holman, *Experimental Methods for Engineers*, Eighth ed., McGraw-Hill, New York, 2012
- [14] A.G. Gaydon, *The Spectroscopy of Flames*, Second ed, Chapman and Hall, London, 1974.
- [15] C.E. Baukal, J. Charles E. Baukal, *Industrial Combustion Testing*, First ed, Taylor & Francis New York, 2011.
- [16] S.R. Turns, *An introduction to combustion concepts and applications*, Third ed., McGraw-Hill, New York, 2012.
- [17] K. Lee, Lee, An experimental study of a cylindrical multi-hole premixed burner for the development of a condensing gas boiler, *Energy* 36 (2011) 4150-4157.
- [18] Y. Ding, D. Durox, N. Darabiha, T. Schuller,

به سطح مشعل منتقل می‌شود سطح داغ مشعل، گرما را در جهت بالادست هدایت و تشعشع می‌کند. در بالادست ناحیه واکنش، دمای جامد بیش از گاز است و بنابراین انتقال حرارت همرفتی جامد به گاز وجود دارد. گازهای ورودی گرم می‌شوند تا زمانی که به دمای اشتعال برسند. در نتیجه بیشینه حرارت آزاد شده در ناحیه کمتر از استوکیومتری رخ می‌دهد. به طور مثال در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ و توان ۱۷/۱۴ کیلووات، ۸۵ درصد نسبت به حالت استوکیومتری حرارت بیشتری وجود دارد. در نسبت هم‌ارزی ۱ در این نوع مشعل‌ها، شعله ناپایدار است.

• با توجه به آنکه در حالت واقعی، مبدل حرارتی روی شعله اثر دارد، بررسی نتایج بدست آمده با وجود مصرف کننده(مبدل حرارتی) در ادامه کار حاضر مفید است. همچنین مطالعه توزیع یکنواخت دما و همگنی دما در درون فضای مشعل به عنوان عاملی برای پایداری و بازده حرارتی شعله می‌تواند در ادامه این پژوهش مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع

- [1] 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. Omid, M.D. Emami, Experimental investigation of premixed combustion and thermal efficiency in a porous heating burner, *International Journal of Energy Research*, 45(2) (2020) 1948-1958.
- [3] H.-W. Huang, Y. Zhang, Flame colour characterization in the visible and infrared spectrum using a digital camera and image processing, *Measurement Science and Technology*, 19(8) (2008).
- [4] J.M. Samaniego, F.N. Egolfopoulos, C.T. Bowman, CO₂* Chemiluminescence in Premixed Flames, *Combustion Science and Technology*, 109(1-6) (1995) 183-203.
- [5] I. Kojima, Nakajima, Spatially resolved measurement of OH, CH, and C₂ chemiluminescence in the reaction zone of laminar me, *Proceedings of the Combustion Institute*, 28 (2000) 1757–1764.
- [6] Y. Hardalupas, M. Orain, Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescent emission from a flame, *Combustion*

[19] F. Song, Z. Wen, Z. Dong, E. Wang, X. Liu, Ultra-low calorific gas combustion in a gradually-varied porous burner with annular heat recirculation, *Energy*, 119 (2017) 497-503.

Chemiluminescence based operating point control of domestic gas boilers with variable natural gas composition, *Applied Thermal Engineering*, 149 (2019) 1052-1060.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Ahmadi, M. Zabetian Targhi , *Investigation of The Surface Flame Burner Functional Diagram Using Chemiluminescence and Image Analysis* , *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(1) (2022) 235-248.

DOI: 10.22060/mej.2021.19602.7063



